

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Par :

MAOUCHE Chams Eddine

BENAYACHE Oussama

Thème

Etude et simulation numérique des problèmes de contacts : La tribologie

Soutenu le 26/06/2023 devant le jury composé de :

Pr. BRADAI Mohand Amokrane

Président

Dr. IDIR Abdelhak

Rapporteur

Dr. YOUNES Rassim

Examineur

Mr. KHIMA Salim

Invité

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

Nos remerciements s'adressent en premier lieu au bon dieu

Nous tenons à remercier notre encadrant **Mr. Idir Abdelhak** qui nous a apporté une aide précieuse.

Nous tenons aussi à remercier les membres de jury, ainsi que tous nos enseignants du Département de Génie Mécanique

Nos remerciements vont aussi à nos familles et nos collègues et nos amis.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon très Cher Père et à ma très Chère Mère qui ont été à mes côtés,

Mes sœurs et toute ma famille sans oublier mes amis un par un et mes collègues durant toute ma carrière comme un étudiant

Chams Eddine

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents, mes frères amis, Abdellah, Sami, et ma sœur et toute ma famille et tous mes amis qui sont derrière moi durent ma carrière comme un étudiant

Oussama

Sommaire

Introduction Générale	8
I.1 La tribologie.....	10
I.2 Problèmes de contacts.....	11
I.3 Les contacts.....	11
I.3.1 Contact localisé.....	12
I.3.1.1 Définition du contact localisé	12
I.3.1.2 Contact élastique	12
I.3.2 Contact surfacique	13
I.3.2.1 Définition du contact surfacique	13
I.3.2.2 Contact élastique	14
I.4 Le frottement.....	14
I.4.1 Types de frottement	15
I.4.1.1 Frottement sec.....	15
I.4.1.2 Frottement hydrodynamique.....	16
I.5 Usure.....	17
I.5.1 Mécanismes d'usure.....	17
I.5.1.1 L'usure par adhésion	17
I.5.1.2 L'usure par abrasion.....	19
I.5.1.3 Usure érosive	19
I.5.1.4 L'usure par fatigue	20
I.5.1.5 L'usure par réactions tribochimiques	21
Introduction	24
II.1 Travaux de Monsieur Naamane Benhassine et ses collaborateurs.	24
II.2 Travaux de Monsieur A. Belhocine et ses Collaborateurs.....	26
II.3 Travaux de Monsieur Renjish Vijay et Ses collaborateurs.	29
Introduction	32
III.1 Présentation de logiciel ABAQUS.....	32
III.2 Création de model et géométrie sur ABAQUS.....	33
III.3 Propriété de matériaux utilisés.....	34
III.4 Les conditions limites et la charge	34
III.5 Le maillage	34
IV.1 Résultats et discussion.....	36

IV.1.1 Etude Numérique	36
IV.1.2 Etude Numérique	38
IV.1.3 Etude Numérique	40
Conclusion.....	43

Liste des figures

Figure 1. a) Disque de frein neuf, b) Disque de frein usé	9
Figure 2. Dessin schématique de tribologie	10
Figure 3: Disque et plaquette de frein d'une voiture	11
Figure 4. Contacts localisés : a) Roulement à bille ; b) Came poussoir	12
Figure 5: Configuration du contact surfacique dans le modèle de Greenwood et Williamson [3]	13
Figure 6. Solide sur un support horizontal [11].	14
Figure 7. Exemple de frottement sec	16
Figure 8. Exemple de frottement hydrodynamique	16
Figure 9: Usure adhésive.....	18
Figure 10. Usure abrasive : (a) à deux corps ; (b) à trois corps [5].....	19
Figure 11.Usure érosive	20
Figure 12. Erosion en fonction de l'angle d'incidence des particules [9].	20
Figure 13. Usure par fatigue d'après [10]	21
Figure 14: Usure par réactions tribochimiques.....	22
Figure 15: disque et plaquette de frein usée	23
Figure 16: Disque de frein usé.....	23
Figure 17: Modèle de frein à friction (maillage)	25
Figure 18. Fractionnement des surfaces pour l'affectation du coefficient de transfert de chaleur	26
Figure 19. Champ de température (°C) dans les trois freins au dernier instant de frottement.....	26
Figure 20. Caractéristiques géométriques du disque ventilé	27
Figure 21. Maillage du disque complet et du disque ventilé.....	28
Figure 22. a)État du glissement par frottement et b) contour de la distance de glissement de l'échantillon revêtu.....	29
Figure 23. a) Pression de contact et b) Contour de pénétration de l'échantillon revêtu	30
Figure 24. Caractéristiques d'usure (a) Représentation graphique (b) Contour de l'échantillon revêtu .	30
Figure 25: Interface de logiciel ABAQUS	32
Figure 26. Une assemblée des deux pièces crée (disque plaquette).....	33
Figure 27. Conditions aux limites de disque et de la plaquette	34
Figure 28.Maillage de la géométrie	35
Figure 29. Température des nœuds du disque de l'essai 1	36
Figure 30. Contraintes VonMises d'essai 1.....	37

Liste des tableaux

Tableau 1. Propriété de matériau utilisé.....	34
Tableau 2. Paramètres d'essais 1 de frottement.....	36
Tableau 3. Paramètres d'essai 2 de frottement.....	38
Tableau 4. Paramètres d'essai 3 de frottement.....	40
Tableau 5 : les résultats des trois essais de frottement.....	42

Introduction Générale

Introduction Générale

La tribologie est la science de l'étude des phénomènes de frottement, d'usure et de lubrification dans les systèmes de contact entre des surfaces en mouvement relatif. Les problèmes de contacts et la tribologie sont des domaines d'étude importants pour de nombreuses industries, telles que l'aéronautique, l'automobile, la fabrication de machines, la biologie, la médecine et l'énergie [1].

L'analyse des problèmes de contact représente une méthode fondamentale pour aborder et résoudre les difficultés rencontrées dans les interactions entre surfaces en contact. À travers des études approfondies et des modélisations avancées, les spécialistes de ce domaine s'efforcent continuellement d'améliorer l'efficacité des systèmes mécaniques en optimisant les paramètres de frottement, d'usure et de lubrification.

Le disque de frein, souvent constitué de fonte ou d'acier allié, joue un rôle crucial dans les systèmes de freinage des véhicules. Il doit supporter les contraintes thermiques et mécaniques imposées par le freinage, tout en maintenant un coefficient de frottement constant avec les plaquettes pour assurer un freinage efficace. Contrairement aux plaquettes, le disque est soumis à une usure principale. Pour améliorer sa durabilité et ses performances, il est nécessaire de développer de nouveaux matériaux et d'optimiser les surfaces tribologiques.

Dans notre étude, le frottement des disques de frein est influencé par plusieurs facteurs, tels que la pression de contact, la vitesse de rotation, la composition des matériaux des plaquettes et des disques, ainsi que l'état de surface des surfaces de contact. La friction entre les surfaces provoque une résistance au mouvement, ce qui permet de contrôler la vitesse du véhicule.

Le disque de frein automobile, comme le montre l'expérience, peut subir des dégradations dont l'origine réside dans les sollicitations couplées mécaniques (pression des garnitures sur le disque et serrage du disque sur le moyeu) et thermiques (l'échauffement par frottement). A cause de la complexité du système, les modélisations numériques ne sont envisageables que si elles reposent sur des hypothèses simplificatrices. Ainsi, la plupart des études ne modélisent pas les phénomènes de contact frottant.

L'objectif de cette étude est de proposer une simulation du comportement mécanique des disques de frein automobiles pour la prédiction de leur tenue à l'usure. L'approche adoptée associe notamment des stratégies numériques réalisées sur le logiciel ABAQUS qui reposent sur des algorithmes adaptés aux problèmes de pièces sous chargement mobile et répété.

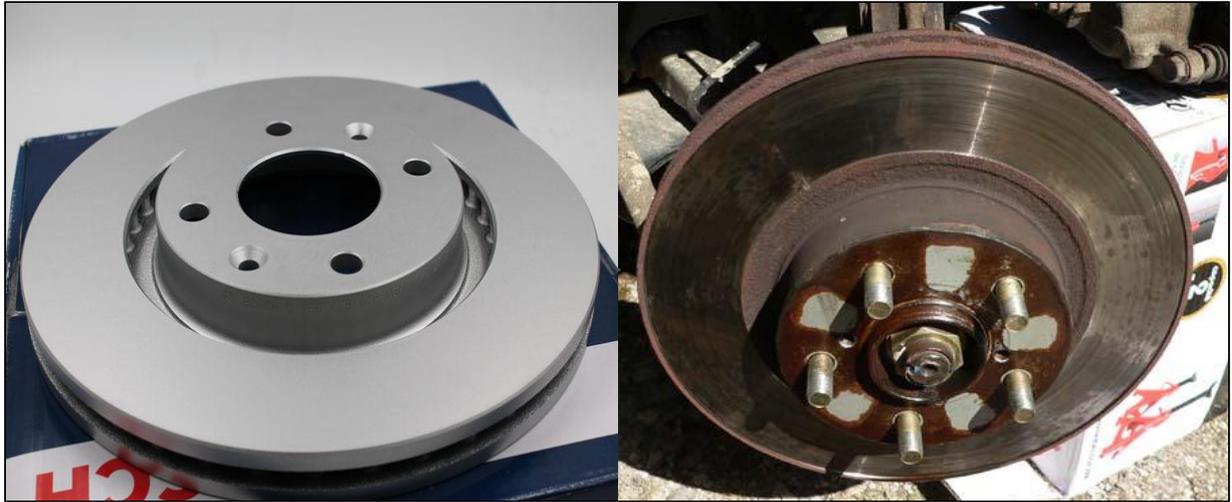


Figure 1. a) Disque de frein neuf, b) Disque de frein utilisé

Chapitre I : Problèmes de contacts Usure et Frottement

Recherche bibliographique

I.1 La tribologie

La tribologie se concentre sur trois phénomènes principaux : le frottement, l'usure et la lubrification. Le frottement est la force qui s'oppose au mouvement relatif des surfaces en contact. L'usure est la perte de matière qui se produit lorsque les surfaces en contact se déplacent les unes par rapport aux autres. La lubrification est le processus de réduction du frottement et de l'usure en introduisant une substance intermédiaire (le lubrifiant) entre les surfaces en contact.

Les chercheurs en tribologie utilisent une variété de techniques pour étudier les phénomènes de frottement, d'usure et de lubrification. Ils peuvent utiliser des microscopes pour étudier la structure des surfaces en contact, des instruments de mesure pour quantifier les forces de frottement et les pertes d'énergie, des essais de frottement et d'usure pour évaluer les propriétés des matériaux et des lubrifiants, et des simulations numériques pour modéliser les processus de tribologie.

En somme, la tribologie est une discipline qui est essentielle pour résoudre les problèmes de frottement, d'usure et de lubrification, et qui a des applications pratiques importantes dans de nombreux domaines de l'ingénierie et de la science.

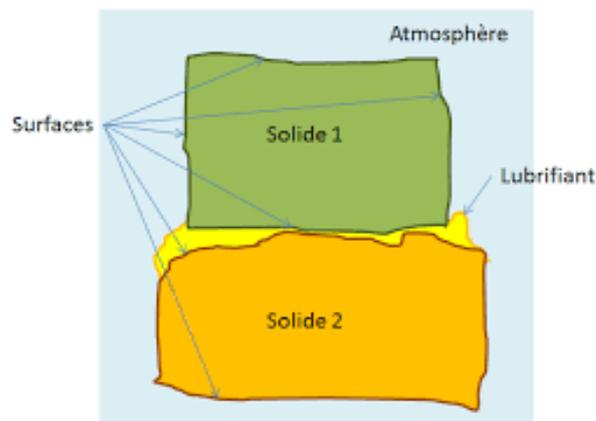


Figure 2. Dessin schématique de tribologie

I.2 Problèmes de contacts

I.3 Les contacts

Les contacts sont l'un des principaux objets d'étude de la tribologie. Ils peuvent être classés en deux catégories principales, les contacts lubrifiés et les contacts non lubrifiés.

Dans les contacts lubrifiés, les surfaces en contact sont séparées par un fluide lubrifiant, comme l'huile ou la graisse. Dans les contacts non lubrifiés, les surfaces sont en contact direct l'une avec l'autre, sans lubrification.



Figure 3: Disque et plaquette de frein d'une voiture

Les contacts non lubrifiés peuvent entraîner des phénomènes de frottement et d'usure importants, car les surfaces en contact peuvent subir des déformations, des microfissures et des échauffements. Dans ce contexte, la tribologie cherche à développer des techniques pour minimiser ces phénomènes, par exemple en utilisant des matériaux de revêtement ou en modifiant la géométrie des surfaces en contact.

Dans les contacts lubrifiés, les phénomènes de frottement et d'usure peuvent également être importants, mais peuvent être contrôlés en sélectionnant le fluide lubrifiant approprié et en optimisant les conditions de lubrification. La tribologie cherche à comprendre comment les propriétés des fluides lubrifiants (viscosité, additifs, etc.) affectent les performances de lubrification et à développer des modèles pour prédire les performances des systèmes lubrifiés.

I.3.1 Contact localisé

I.3.1.1 Définition du contact localisé

Lorsque l'aire de contact est un point ou une ligne, le contact est dit local. Ce type de contact est courant dans les machines (figure 1). Il y a contact ponctuel entre les billes du roulement et les bagues. Le contact entre la came et les poussoirs des soupapes du moteur est le long d'une ligne. En supposant que les solides sont rigides et parfaitement formés, la surface de contact est nulle et donc la pression de contact est infinie. Bien sûr, cette conclusion est irréaliste.

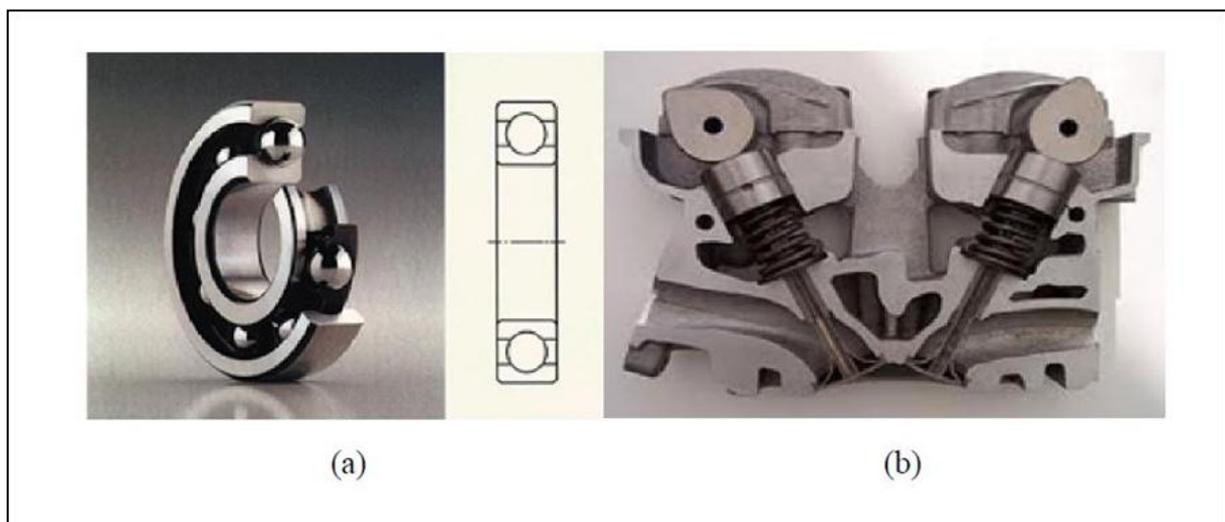


Figure 4. Contacts localisés : a) Roulement à bille ; b) Came poussoir

I.3.1.2 Contact élastique

En 1881, Heinrich Hertz proposa une théorie bien connue en mécanique des contacts qui permettait de calculer les propriétés des contacts localisés élastiques[2]. Les hypothèses utilisées sont les suivantes

- Les surfaces sont continuées, lisses et non-conformes (c'est-à-dire que leurs rayons de courbure sont très différents)
- Les déformations et les déplacements sont petits
- Chaque solide est un demi-espace infini élastique linéaire
- Le contact est sans frottement

Nous ne nous intéressons qu'au contact des sphères sur un plan, comme le montre la figure

I.3.2 Contact surfacique

I.3.2.1 Définition du contact surfacique

Les contacts surfaciques se produisent lorsque deux surfaces solides sont en contact direct l'une avec l'autre, sans être séparées par un lubrifiant. Ce type de contact est courant dans de nombreux systèmes mécaniques, tels que les roulements, les engrenages et les arbres. Les contacts surfaciques peuvent causer des problèmes de frottement, d'usure et de fatigue, qui peuvent réduire la durée de vie des composants et affecter les performances globales des systèmes.



Figure 2. Exemples de contacts surfaciques : a) Prothèse de hanche, b) Garniture mécanique

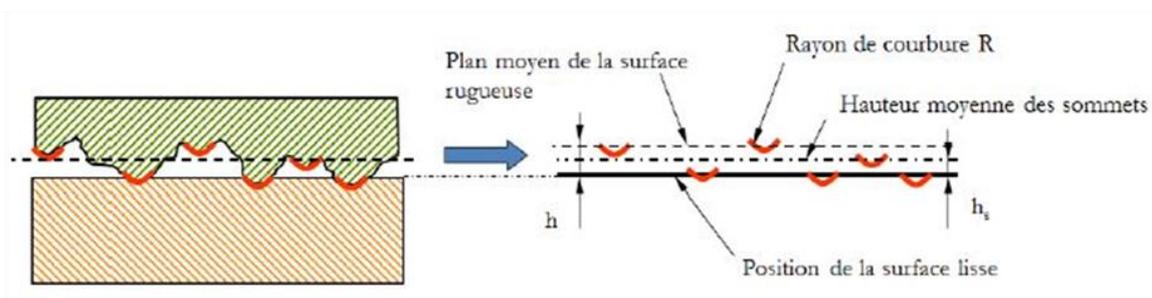


Figure 5: Configuration du contact surfacique dans le modèle de Greenwood et Williamson [3]

I.3.2.2 Contact élastique

Greewood et Williamson [3] ont proposé une description très simplifiée du contact de surface, mais elle a l'avantage de fournir des relations analytiques très faciles à manipuler et à exploiter.

Comme nous le verrons, cette approche permet de mettre en évidence un certain nombre d'observations expérimentales.

- Une des surfaces est parfaitement lisse
- Les aspérités de la surface rugueuse ont un sommet sphérique de rayon constant R
- La hauteur des sommets suit une distribution Gaussienne d'écart-type
- Chaque sommet se déforme indépendamment
- Chaque sommet se comporte comme un contact élastique sphère-plan

I.4 Le frottement

Le frottement peut être défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un corps solide se déplace tangentiellement à la surface d'un autre corps avec lequel il entre en contact, ou lorsqu'un corps tente de provoquer le déplacement d'un autre [11].

Quel que soit le matériau d'un solide, sa surface n'est pas parfaitement lisse. Comme le montre la Figure 10, il est rugueux, avec des irrégularités dues à l'usinage ou encore à la nature de la pièce. Lorsque deux pièces mécaniques en contact se déplacent l'une par rapport à l'autre, ces bosses se déforment et se heurtent en dissipant de l'énergie. Cette énergie se manifeste sous forme de frottement à l'échelle macroscopique. Selon le matériau utilisé, il y aura plus de déformation élastique ou plus d'impact avant de déchirer le matériau [12].

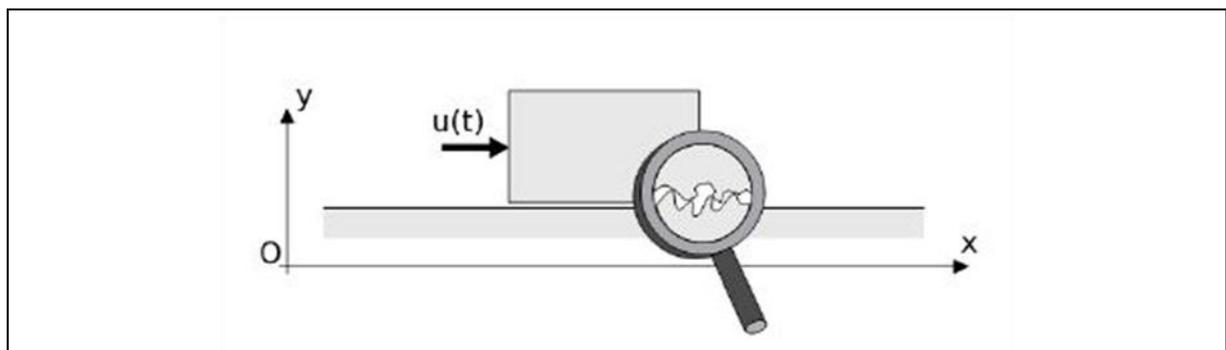


Figure 6. Solide sur un support horizontal [11].

I.4.1 Types de frottement

I.4.1.1 Frottement sec

Le frottement sec est le type de frottement qui se produit lorsque les surfaces en contact ne sont pas lubrifiées et sont en contact direct. Les surfaces peuvent être solides, comme dans le cas du frottement entre deux pièces métalliques, ou molles, comme dans le cas du frottement entre une pièce en caoutchouc et une surface rigide.

Le frottement sec désigne l'ensemble des phénomènes qui se produisent dans la zone de contact entre deux objets qui, en l'absence de lubrification, empêchent le glissement de ces objets. S'il y a glissement relatif entre deux objets en contact, on parle de frottement cinétique, sinon on parle de frottement statique. Comprendre les mécanismes impliqués

Le frottement sec est principalement dû à l'interaction entre les aspérités des deux surfaces en contact. Les aspérités sont les petites irrégularités de surface qui se trouvent à l'échelle microscopique. Lorsque deux surfaces sont en contact, les aspérités s'interfèrent, créant une force de frottement qui s'oppose au mouvement.

La force de frottement sec dépend de plusieurs facteurs, tels que la rugosité des surfaces en contact, la nature des matériaux, la force de pression appliquée et la vitesse de glissement. La rugosité est un paramètre important, car elle détermine le nombre et la hauteur des aspérités en contact. Plus les surfaces sont rugueuses, plus la force de frottement est importante.

Malgré l'intérêt porté au problème au fil des années, le jeu est resté longtemps très incomplet. Ce n'est qu'au cours des dernières décennies que des progrès significatifs ont été réalisés grâce à l'accumulation de données expérimentales et de résultats théoriques [13].

Le modèle de Bowden et Tabor [1] postule que le frottement sec entre deux surfaces rugueuses est principalement dû à deux processus physiques fondamentaux : le cisaillement des microjonctions visqueuses formées aux points de contact et le sillon des surfaces rugueuses. Ainsi, le frottement sec est la somme du cisaillement dû à l'adhérence et de la déformation due au travail du sol [14], [15]

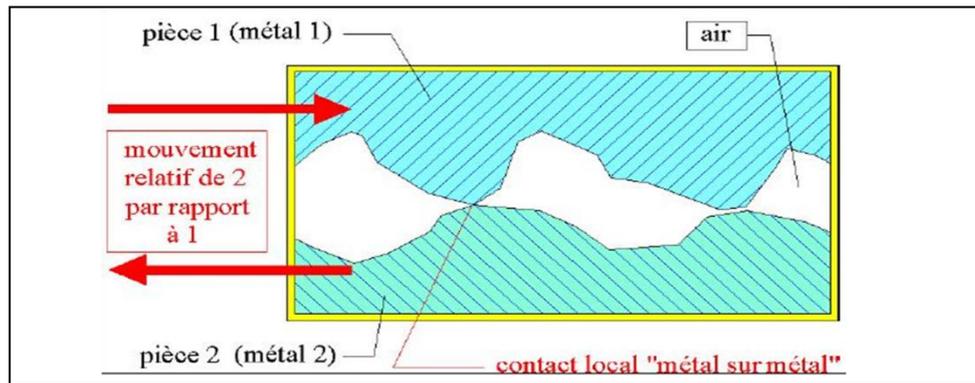


Figure 7. Exemple de frottement sec

I.4.1.2 Frottement hydrodynamique

Le frottement hydrodynamique est un type de frottement qui se produit entre deux surfaces en mouvement relatif, qui sont séparées par un film de fluide (Figure 9). Il est différent du frottement sec, qui se produit lorsque deux surfaces en contact direct sont frottées l'une contre l'autre.

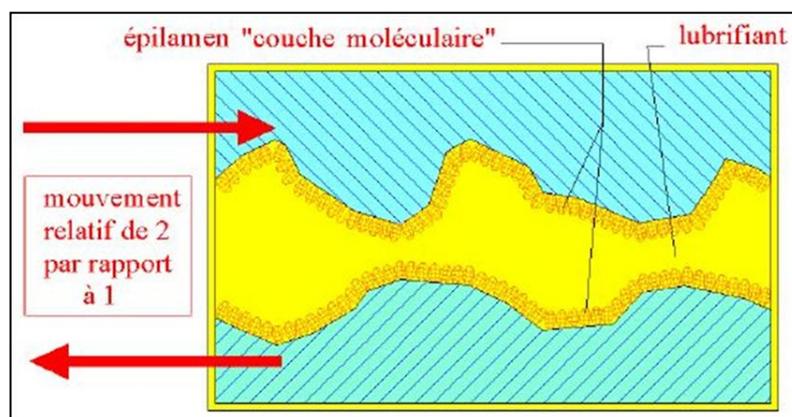


Figure 8. Exemple de frottement hydrodynamique

Les surfaces relativement mobiles ne sont pas en contact avec leurs aspérités car elles sont séparées par un épais film lubrifiant. Avec un faible coefficient de frottement, ce type de frottement est adapté aux vitesses élevées ou aux forces normales élevées [16].

Il existe plusieurs paramètres qui influencent le frottement hydrodynamique. Permis eux on identifier :

Chapitre I : Problèmes de contacts usure et frottement

1. Vitesse de glissement : la vitesse de glissement entre les surfaces en mouvement est un facteur clé qui affecte la magnitude du frottement hydrodynamique. En général, plus la vitesse de glissement est élevée, plus la force de frottement est faible.
2. La viscosité du fluide : la viscosité du fluide est un autre paramètre important qui affecte le frottement hydrodynamique. En général, les fluides à faible viscosité, tels que l'eau, ont tendance à réduire le frottement hydrodynamique, tandis que les fluides à haute viscosité, tels que l'huile épaisse, ont tendance à augmenter le frottement.
3. Épaisseur du film de fluide : l'épaisseur du film de fluide qui sépare les surfaces en mouvement est également un paramètre important qui influence le frottement hydrodynamique. Plus le film de fluide est épais, plus la force de frottement est faible.
4. La pression de fluide : la pression de fluide qui agit sur les surfaces en mouvement peut également affecter le frottement hydrodynamique. En général, une pression plus élevée réduit le frottement, tandis qu'une pression plus faible augmente le frottement.

I.5 Usure

L'usure est définie comme la perte de matière due au contact et au frottement entre deux surfaces en mouvement relatif. Elle peut être causée par des processus tels que l'abrasion, la fatigue et la corrosion. L'usure peut se produire dans divers contextes, tels que l'utilisation d'une machine, le transport de marchandises, etc. L'usure est un phénomène naturel qui se produit lorsque deux surfaces entrent en contact et est inévitable dans de nombreux processus industriels et mécaniques. Cependant, la compréhension des mécanismes d'usure et des méthodes pour réduire l'usure peut aider à prolonger la durée de vie des machines et des équipements, à améliorer l'efficacité des processus et à réduire les coûts d'entretien et de réparation.

I.5.1 Mécanismes d'usure

Il existe plusieurs mécanismes d'usure différents, voici quelques mécanismes les plus courants

I.5.1.1 L'usure par adhésion

L'usure adhésive se caractérise par le transfert de débris de l'un des deux antagonistes à l'autre, soit par des mécanismes d'origine purement mécanique, soit suite à des réactions

Chapitre I : Problèmes de contacts usure et frottement

physico-chimiques. La présence de microrugosités au contact entraîne une diminution de la surface de contact et génère de très fortes énergies au niveau de la jonction, favorisant ainsi les réactions physico-chimiques.

L'usure adhésive se produit lorsque des surfaces en contact subissent des charges cycliques de faible amplitude. Des charges répétitives, de petites aspérités de surface sont écrasées et enformées, ce qui peut entraîner une adhérence locale entre les surfaces. Lorsque ces surfaces adhèrent, elles peuvent se séparer avec une force suffisante pour arracher de petits fragments de matériau, créant ainsi des micro-abrasions et des microfissures.

Le résultat final de l'utilisation de l'adhésif est la généralisation d'une surface rugueuse avec des zones crevassées et des bosses. Dans les cas graves, cela peut entraîner des défaillances du matériau et des ruptures.

Lors du frottement, il existe de nombreux microcontacts entre les matériaux opposés qui supportent la totalité de la charge normale. En effet, dans ces régions, la contraction des lignes de force produit des concentrations de contraintes et des élévations de température. L'évolution de ces aspérités dépend des conditions de contraintes et de l'environnement.

L'équilibre est atteint lorsque la force d'adhérence du film de transfert est supérieure à la force de frottement. Sinon, la contrainte de cisaillement résultante peut provoquer des fissures et la formation de débris à l'interface surface/film de transfert. Ceux-ci peuvent être progressivement expulsés du contact, laissant une surface hautement réactive où de nouveaux processus de dégradation ont lieu. Si des débris restent dans les contacts, la zone de contact réelle augmente et fournit une portance.



Figure 9: Usure adhésive

I.5.1.2 L'usure par abrasion

L'usure par abrasion est un type d'usure qui se produit lorsqu'un matériau est exposé à des particules solides, des grains ou des matériaux abrasifs frottant contre sa surface. On le voit le plus souvent dans les contacts métalliques, tels que les engrenages, les pistons et les roulements, mais il peut également se produire dans d'autres types de matériaux tels que les polymères, les céramiques et les composites [4].

L'usure par abrasion se produit lorsque des particules solides, telles que du sable, de la poussière ou des copeaux de métal, sont piégées entre les surfaces de contact et sont frottées contre ces surfaces sous pression. Ces particules agissent comme des abrasifs, grattant et érodant la surface du matériau et créant ainsi de fines abrasions.

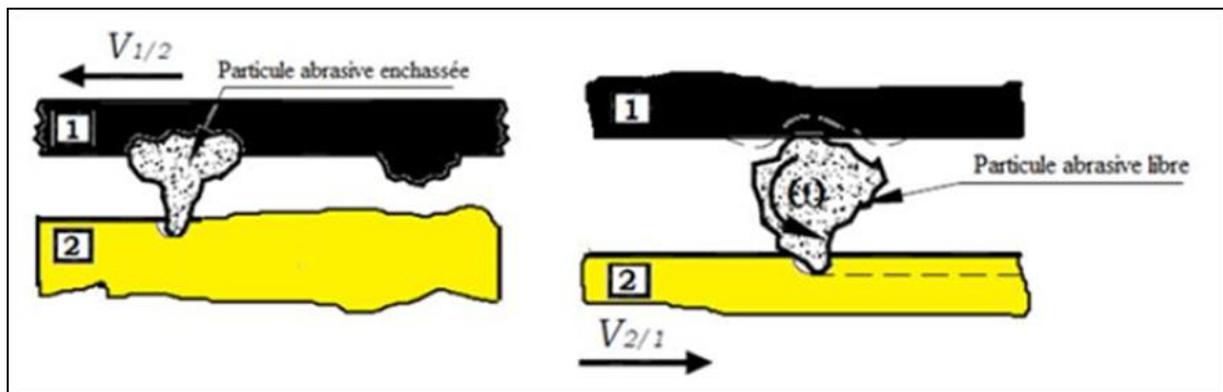


Figure 10. Usure abrasive : (a) à deux corps ; (b) à trois corps [5].

Le résultat final de l'usure par abrasion est généralement une surface rugueuse avec des rayures et des entailles. Dans les cas graves, cela peut entraîner une défaillance matérielle et une rupture. D'après Tabor [6], la dureté des particules est en moyenne de 20% supérieure à celle de la surface initiale.

I.5.1.3 Usure érosive

L'usure érosive est définie comme la perte de matière causée par les particules contenues dans un fluide en mouvement frappant une surface solide. Comme dans le cas de l'usure par abrasion, plusieurs paramètres affectent ce modèle d'usure :

- La taille, le nombre, la morphologie et la vitesse des particules.
- L'angle d'impact qui définit le faciès des endommagements observés

Les angles d'incidence faibles favorisent les effets de coupe, tandis que l'incidence normale provoque plus de distorsion. L'intensité des dommages dépend également des propriétés du matériau (figure 11). Les résultats montrent que dans le cas des matériaux ductiles, l'érosion est plus importante aux faibles angles d'attaque, et inversement, l'érosion est plus importante à incidence normale pour les matériaux fragiles [9].



Figure 11. Usure érosive

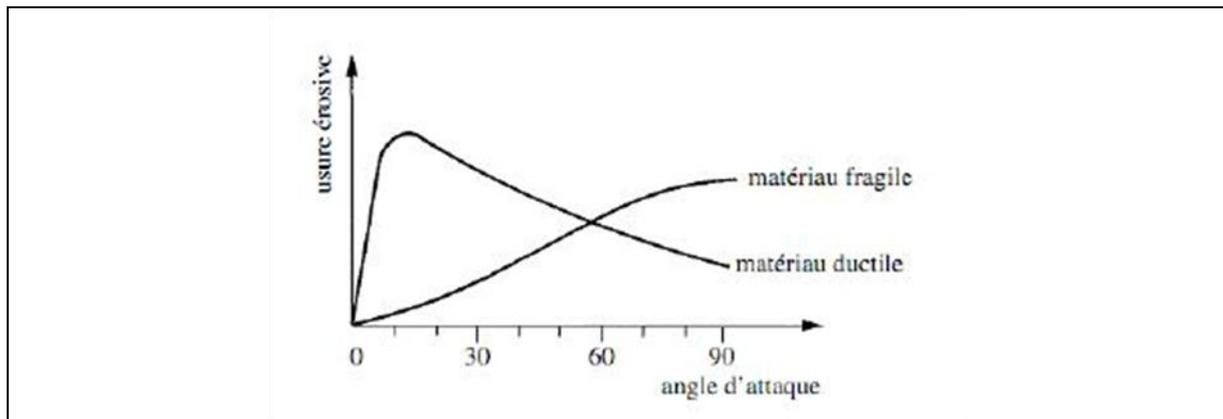


Figure 12. Erosion en fonction de l'angle d'incidence des particules [9].

I.5.1.4 L'usure par fatigue

L'usure par fatigue est un type d'usure en tribologie qui se produit lorsque des matériaux subissent des contraintes cycliques répétées. Ce type d'usure est souvent observé dans les pièces soumises à des charges fluctuantes, telles que les engrenages, les ressorts, les arbres et les roulements.

L'usure par fatigue est généralement causée par l'initiation et la propagation de fissures dans le matériau. Les contraintes cycliques répétées créent des microfissures dans le matériau, qui

peuvent ensuite se propager jusqu'à ce que le matériau se fracture. Les fissures peuvent se propager en surface ou à l'intérieur du matériau (Figure 8)

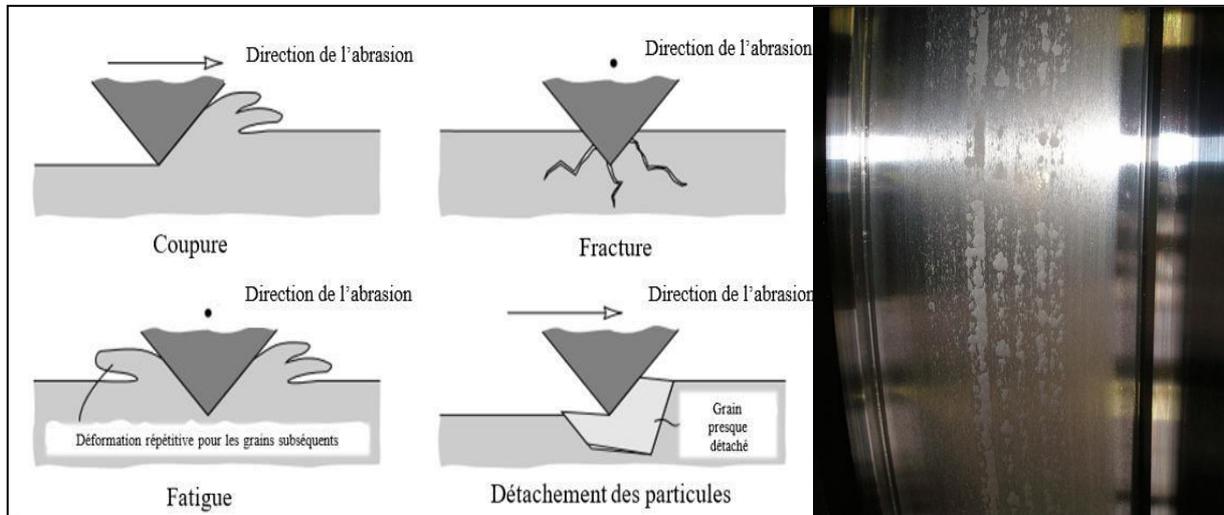


Figure 13. Usure par fatigue d'après [10]

Pour les matériaux fragiles (généralement la céramique), les fissures prennent naissance dans les zones les plus sollicitées en traction. Ils sont liés à des dépassements locaux du seuil de rupture du matériau. Ils se situent derrière le point de contact et se propagent perpendiculairement à la surface. C'est l'usure par fracturation [10].

I.5.1.5 L'usure par réactions tribochimiques

L'usure par réactions tribochimiques est un type d'usure en tribologie qui est causé par des réactions chimiques entre les surfaces en mouvement relatif. Ces réactions peuvent entraîner la formation de produits d'usure qui se détachent des surfaces en contact, ce qui peut à son tour conduire à une usure plus importante.

Les réactions tribochimiques peuvent être causées par divers facteurs, notamment la présence d'oxygène ou d'humidité, la température, la pression et la composition chimique des matériaux en contact. Par exemple, lorsque deux surfaces métalliques en contact glissent l'une contre l'autre, des réactions chimiques peuvent se produire entre les atomes de surface et les molécules d'oxygène de l'air, entraînant la formation de produits d'usure tels que de l'oxyde.

L'usure se manifeste lorsque la contrainte de frottement au contact fait disparaître les couches formées. La cinétique de ce phénomène dépend donc de la compétition entre la formation du film réactif et l'endommagement par frottement. La réactivité du support est essentielle pour lutter contre l'usure adhésive, car elle doit être suffisamment élevée pour former rapidement un film protecteur, mais pas au point de consommer les objets en contact [10].

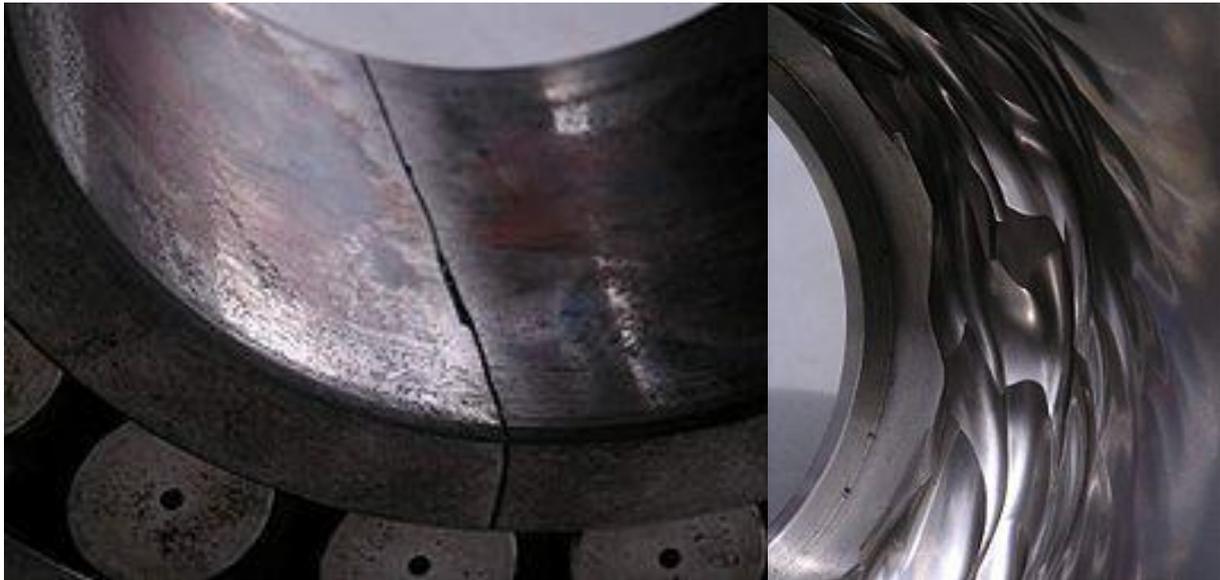


Figure 14: Usure par réactions tribochimiques

I.5.2 Usure des disques de frein

L'usure des disques de frein est principalement causée par le frottement continu des plaquettes de frein contre les disques lors du freinage. Cela crée de la chaleur, de l'abrasion et peut conduire à une diminution de l'épaisseur du disque au fil du temps.

On peut détecter l'usure des disques de frein par des signes tels que des grincements ou des vibrations lors du freinage, une diminution de l'efficacité du freinage, ou même des vibrations dans la pédale de frein. Lorsque les disques de frein sont usés au-delà de la limite recommandée ou s'ils présentent des signes de déformation, de fissuration ou de rainures profondes voire (Figure 15), (Figure 16), ils doivent être remplacés. Les disques de frein usés peuvent compromettre la sécurité et l'efficacité du système de freinage.



Figure 15: disque et plaquette de frein usée



Figure 16: Disque de frein usé

Chapitre II

Travaux issus sur la
modélisation des problèmes de
contacts : Cas du frottement

Introduction

Le domaine de la tribologie englobe de nombreux articles portant sur les phénomènes d'interaction et de frottement entre les surfaces en contact. Dans cette section, nous présenterons un aperçu des travaux réalisés par des chercheurs spécialisés dans ce domaine, en fournissant des résumés des études les plus pertinentes.

II.1 Travaux de Monsieur Naamane Benhassine et ses collaborateurs.

Sur l'étude comparative du comportement thermomécanique transitoire du frottement des disques de frein en céramique : Effet de champ de température [18], Les travaux de Monsieur Naamane Benhassine et de ses collaborateurs (2018) se concentrent sur une étude comparative du comportement thermomécanique transitoire du frottement des disques de frein en céramique, en se penchant sur l'effet du champ de température. Pour réduire la température pendant le frottement, les ingénieurs en fabrication mécanique ont introduit des ailettes de ventilation dans la géométrie des disques de frein métalliques. De plus, les constructeurs automobiles, en particulier ceux des voitures roulant à grande vitesse, ont opté pour l'utilisation de nouveaux matériaux composites à base de céramique pour leurs disques de frein.

L'étude comparative analyse le comportement thermoélastique, à la fois isotrope et anisotrope, de trois matériaux de disque différents en utilisant la méthode des éléments finis avec Abaqus/CAE. Les trois matériaux composites étudiés pour les disques de frein sont : un MMC isotrope A359/SiC p20, un autre MMC Al6061/SiC et un composite C/C-SiC avec une matrice organique et des fibres céramiques.

Le modèle de frein étudié est composé d'un disque utilisé dans les voitures de sport. L'étude compare les performances de différents matériaux composites pour les disques, le modèle du frein comprend un disque ventilé de 420 mm de diamètre avec 30 ailettes de ventilation, ainsi qu'une garniture de frein comportant deux fentes et trois surfaces de contact avec les pistons. Seule la partie de l'anneau de frottement composite est considérée dans cette étude, et les trous et chanfreins ont été supprimés pour faciliter la convergence de la solution.

La méthode des éléments finis est utilisée pour le maillage des corps étudiés, en utilisant des éléments tétraédriques en raison de leur bonne convergence de la solution thermique et de leur adaptation à la complexité géométrique du disque de frein. Le disque est composé de plus

de 200 000 éléments, tandis que chaque garniture de frein et chaque plaque arrière sont composées de milliers d'éléments.

Les conditions limites appliquées représentent une séquence de frottement d'une seconde. Une pression constante est appliquée aux surfaces des plaques arrière, ce qui est ensuite transmis aux garnitures de frein pour fournir une pression de contact apparente.

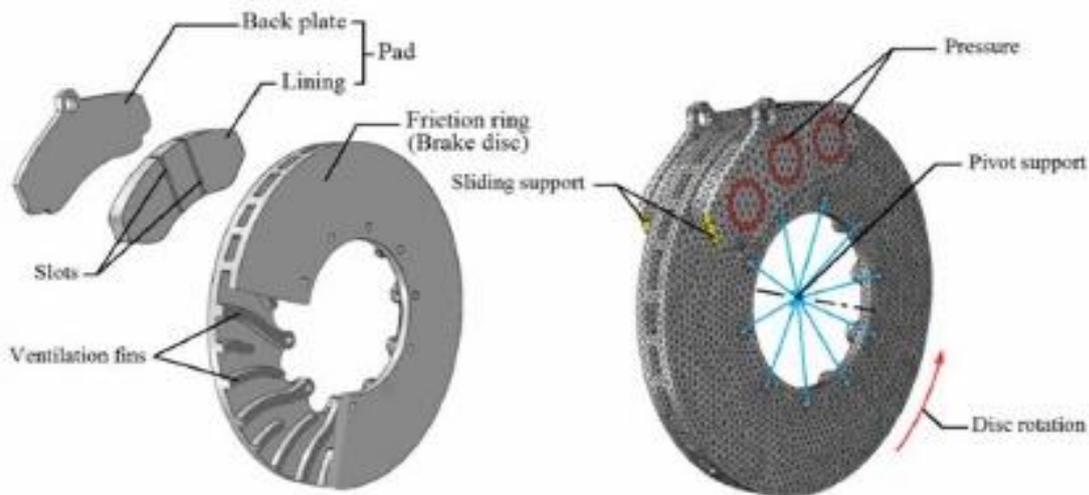


Figure 17: Modèle de frein à friction (maillage)

Les chercheurs ont également observé le champ de pression sur les surfaces des garnitures de frein à différents moments, montrant des variations de pression et des configurations spécifiques en fonction du temps et du matériau du disque.

Enfin, les chercheurs ont noté une légère variation du couple de freinage enregistré dans le cas du frottement des garnitures de frein organiques C/C avec le disque composite A359/SiC p20, attribuée à l'effet du champ de température sur la pression de contact et à l'altération de la stabilité du couple de freinage.

Ces résultats fournissent des informations importantes sur le comportement thermomécanique des disques de frein en céramique et des garnitures de frein, ce qui pourrait contribuer à l'amélioration de la conception et de la performance des systèmes de freinage automobile.

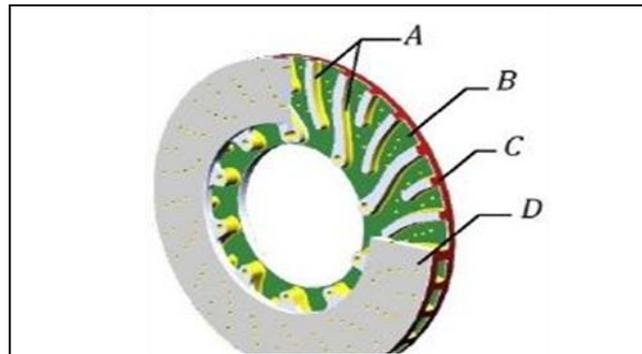


Figure 18. Fractionnement des surfaces pour l'affectation du coefficient de transfert de chaleur

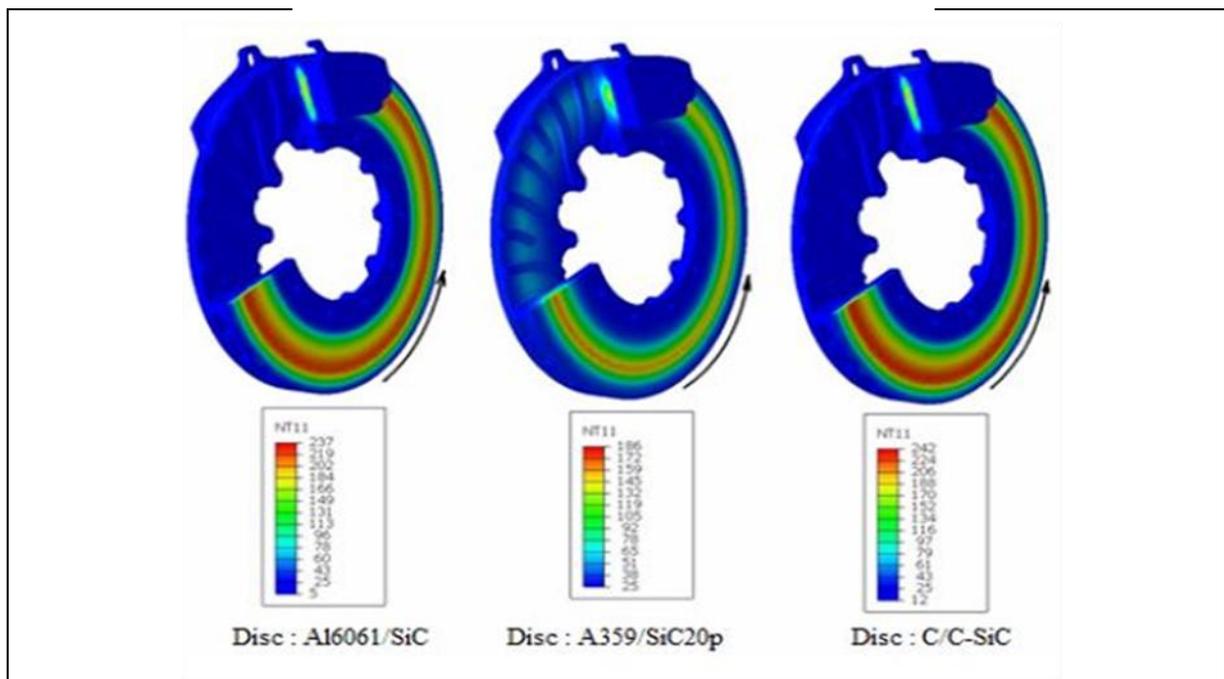


Figure 19. Champ de température (°C) dans les trois freins au dernier instant de frottement.

A travers cette études les auteurs ont conclus que :

La variation de la pression de contact maximale due aux changements de température a une influence indirecte sur le couple de freinage, qui devrait être théoriquement constant. Même si cette variation est faible, elle doit être soulignée dans le cas du frottement du disque en A359/SiC p20.

II.2 Travaux de Monsieur A. Belhocine et ses Collaborateurs.

Sur la modélisation numérique d'un système de freinage à disque en contact frictionnel [19], A. Belhocine et ses collaborateurs (2014) présente une modélisation numérique d'un système de freinage à disque en contact frictionnel, en se concentrant également sur le

problème du crissement des freins. Le crissement est un bruit à haute fréquence causé par des vibrations auto-excités résultant de variations de la force de frottement entre le matériau de friction et le rotor.

L'étude souligne l'importance de la température de l'interface dans les effets du frottement et de l'usure, et la nécessité de mesures de température de surface pour comprendre et prédire ces effets. Le flux de chaleur entrant dépend du coefficient de friction du disque de frein et de sa vitesse angulaire, tandis que l'échange de chaleur est influencé par les matériaux utilisés pour les surfaces de friction et les conditions environnementales externes.

Le modèle utilisé représente un disque de frein solide tridimensionnel comprimé par deux plaquettes de friction de largeur finie. La surface du disque est divisée en différentes régions, avec des calculs de flux de chaleur en raison du frottement entre les plaquettes et le disque dans certaines régions, et de la convection dans d'autres régions. Les nœuds du rayon du moyeu du disque sont fixes, ce qui signifie qu'il n'y a pas de déplacements radiaux, axiaux ou angulaires.

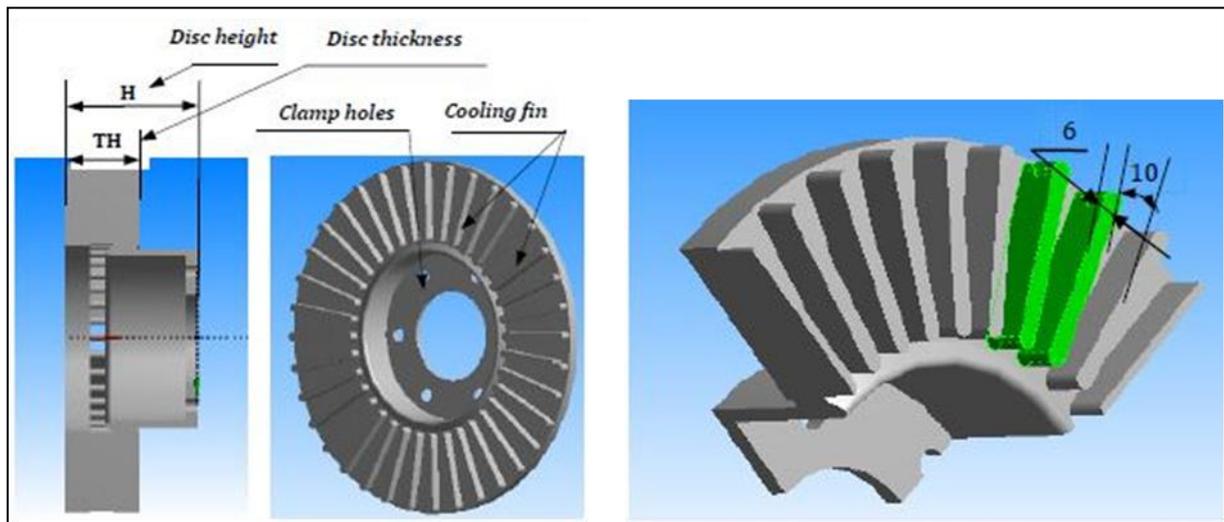


Figure 20. Caractéristiques géométriques du disque ventilé

Les rotors sont en fonte pour trois raisons :

- Elle est relativement dure et résiste à l'usure.
- Elle est moins chère que l'acier ou l'aluminium.
- Elle absorbe et dissipe bien la chaleur pour refroidir les freins.

la considération de la symétrie dans le disque pris seulement le quart de la géométrie du champ fluide.

Le maillage du disque est réalisé en utilisant des éléments tétraédriques, en prenant en compte la symétrie du disque.

Cette étape consiste à préparer le maillage du champ de fluide.

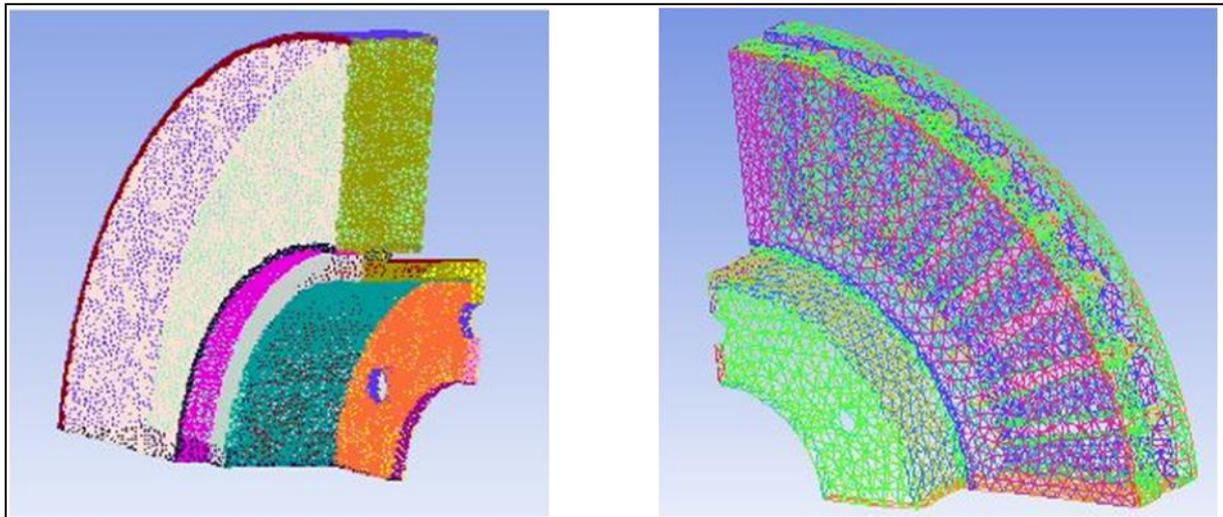


Figure 21. Maillage du disque complet et du disque ventilé

Les conditions aux limites sont définies pour la simulation, en spécifiant les propriétés physiques des matériaux et en choisissant le mode de simulation (permanent ou transitoire). La température initiale du disque est fixée à 20 °C, et le matériau utilisé est de la fonte grise FG 15.

Les résultats de l'étude montrent que les disques de frein étudiés, en fonte à haute teneur en carbone, présentent des flux de chaleur entrants calculés à partir d'une relation spécifiée. La surface du disque est divisée en régions distinctes, où le flux de chaleur est déterminé par le frottement avec les plaquettes de friction et où la convection se produit. Les nœuds sur le rayon du moyeu du disque sont fixes, tandis que les autres régions de la surface du disque ont soit une température spécifiée, soit sont calculées.

Les auteurs ont conclu que

Les résultats de la simulation ont montré que la ventilation radiale joue un rôle crucial dans le refroidissement du disque pendant le freinage. L'influence du mode de freinage sur le

comportement thermique du disque a également été étudiée. Plusieurs paramètres ont été identifiés comme influençant la qualité des résultats, tels que les paramètres technologiques, numériques et physiques.

II.3 Travaux de Monsieur Renjish Vijay et Ses collaborateurs.

Sur l'analyse numérique des caractéristiques d'usure de l'alliage d'aluminium 6061 revêtu de zircone [21], Selon Renjish Vijay et ses collaborateurs (2021), dans cette étude est d'évaluer des paramètres tels que la contrainte de frottement, la pression de contact, la pénétration, l'épaisseur d'usure et l'état de glissement du revêtement de zircone stabilisée à l'yttrium sur AL6061

Les auteurs ont utilisé un tribomètre à broche sur disque pour effectuer des expériences et collecter des données d'entrée. Les paramètres expérimentaux comprenaient la vitesse de glissement, la distance de glissement, la charge, l'épaisseur du revêtement, la vitesse de rotation du disque et le diamètre de la trace d'usure.

En utilisant une analyse non linéaire par éléments finis (FEA), les chercheurs ont effectué une analyse numérique de l'échantillon d'usure. Le modèle d'usure incluait un contact collé avec un coefficient de frottement de 0,25 entre le revêtement en zircone stabilisée à l'yttrium et le disque, ainsi qu'un contact frictionnel entre le revêtement et l'axe.

Les résultats de l'analyse ont montré un glissement entre le revêtement et le matériau rigide du disque. La distance de glissement moyenne était de 0,243 mm, légèrement différente de la valeur calculée de 0,251 mm, ce qui indique que le matériau du disque a subi une révolution complète.

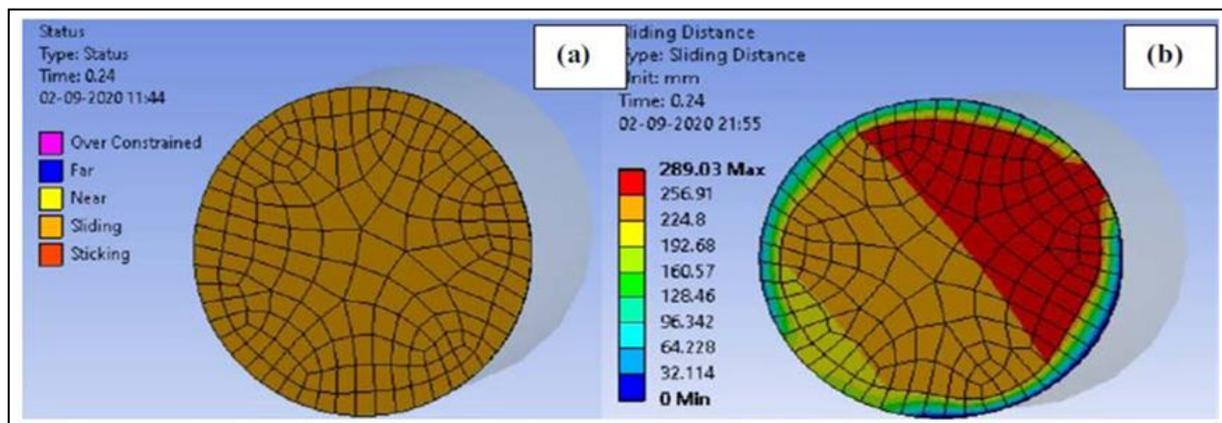


Figure 22. a) État du glissement par frottement et b) contour de la distance de glissement de l'échantillon revêtu

Concernant la pression de contact et la pénétration sont corrélées l'une à l'autre Selon les résultats détenus

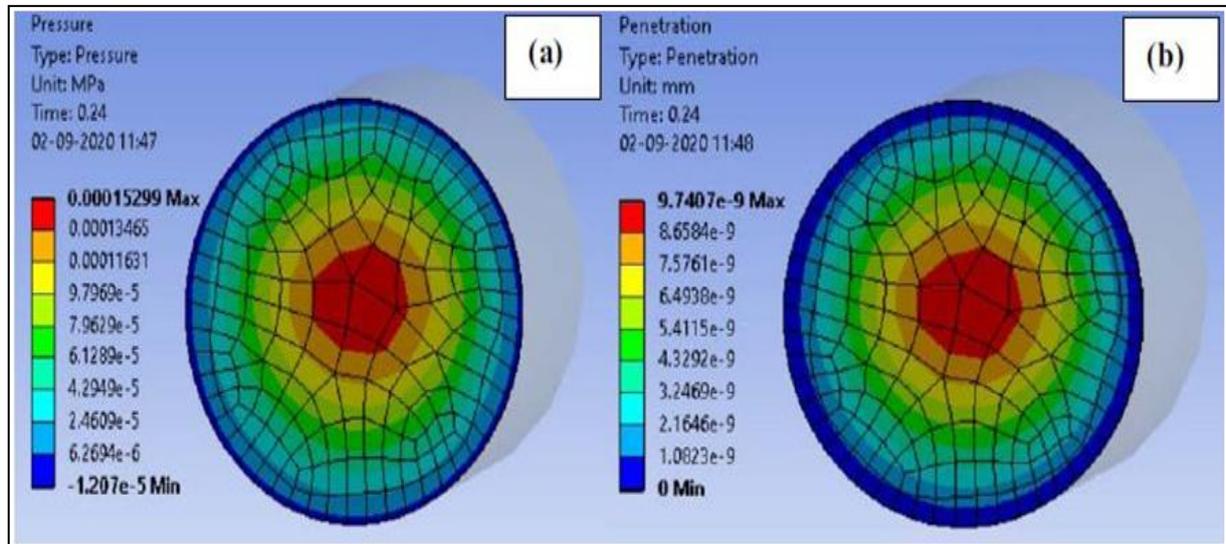


Figure 23. a) Pression de contact et b) Contour de pénétration de l'échantillon revêtu

Les chercheurs ont observé une corrélation entre la pression de contact et la pénétration. La pression de contact était élevée au centre de la surface de la broche, ce qui entraînait une augmentation de la contrainte de frottement. L'usure de la surface centrale de la goupille était maximale, correspondant à la zone de pression de contact maximale.

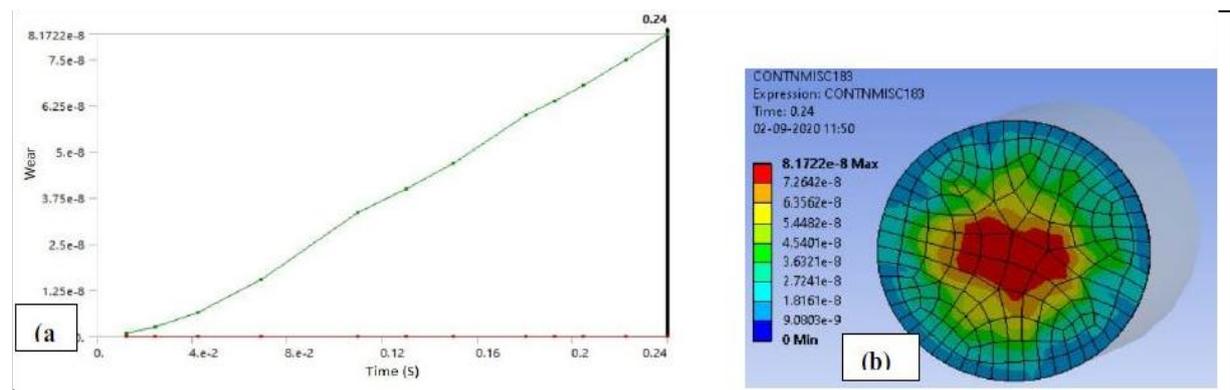


Figure 24. Caractéristiques d'usure (a) Représentation graphique (b) Contour de l'échantillon revêtu

Les auteurs ont conclu que : le phénomène de collage n'était pas observé quel que soit la charge appliquée. La pression de contact élevée dans la région centrale pouvait entraîner une usure locale. Une usure maximale a été observée là où la pression de contact était maximale. La contrainte de frottement était également maximale dans cette région. Les chercheurs ont

Chapitre II : Travaux issus sur la modélisation des problèmes de contacts : Cas du frottement

noté que l'utilisation d'un maillage plus fin permettrait d'obtenir une meilleure précision des résultats, mais cela prolongerait le temps de calcul.

Les résultats ont montré des relations entre la pression de contact, la pénétration, la contrainte de frottement et l'usure, mettant en évidence l'importance de ces facteurs dans le comportement tribologique du revêtement.

Chapitre III

Création du modèle de l'étude

Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la simulation d'un système composé d'un disque et d'une plaquette de frein à l'aide du logiciel de simulation ABAQUS. Nous explorerons les différentes étapes de cette simulation, mettant en évidence l'utilisation et les fonctionnalités spécifiques du logiciel ABAQUS pour analyser et modéliser ce système tribologique.

III.1 Présentation de logiciel ABAQUS

ABAQUS est un logiciel de calcul par éléments finis développé par DASSAULT. Il se compose de trois produits principaux : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. La gamme de logiciels d'ABAQUS est renommée pour sa technologie de pointe, sa qualité et sa fiabilité. Elle est devenue un élément essentiel des processus de conception dans de nombreuses entreprises de renommée mondiale, quel que soit leur secteur d'activité.

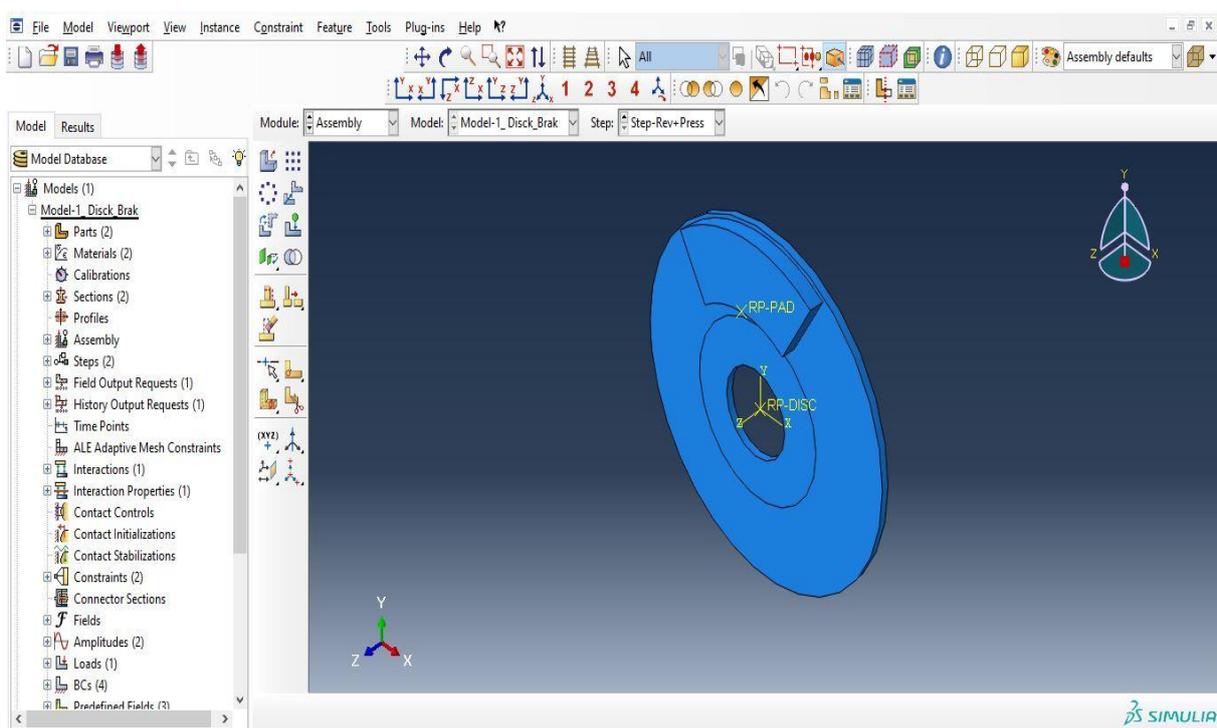


Figure 25: Interface de logiciel ABAQUS

ABAQUS propose les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Ce logiciel offre un environnement exceptionnel pour l'analyse par éléments finis, offrant de nombreuses options et alternatives pour les opérations impliquant différents fournisseurs et produits. Grâce à sa flexibilité et à sa puissance de calcul, ABAQUS

permet d'effectuer des simulations avancées, de modéliser des comportements complexes et de résoudre des problèmes de manière précise et efficace.

En choisissant ABAQUS, les utilisateurs bénéficient d'une plateforme complète et polyvalente pour la simulation et l'analyse des systèmes mécaniques. Que ce soit pour des études de résistance, des analyses de déformation ou des simulations de comportements dynamiques, ABAQUS offre les fonctionnalités nécessaires pour mener à bien ces tâches de manière approfondie et précise.

III.2 Création de model et géométrie sur ABAQUS

On change ses disques quand ces derniers ont perdu certains épaisseur (usé) entre 10% et 15% cela représente environ 1.5mm maximum, la perde de l'épaisseur ou bien l'usure est à cause du frottement entre le disque et la plaquette III.3Céation d'un disque et d'une plaquette

Suivant les étapes appropriées, nous serons en mesure de créer un assemblage de deux pièces dans ABAQUS en utilisant le mode "Explicit Model". Et on va personnaliser les paramètres et les dimensions en fonction de nos besoins spécifiques, comme la montre la figure ci-dessus

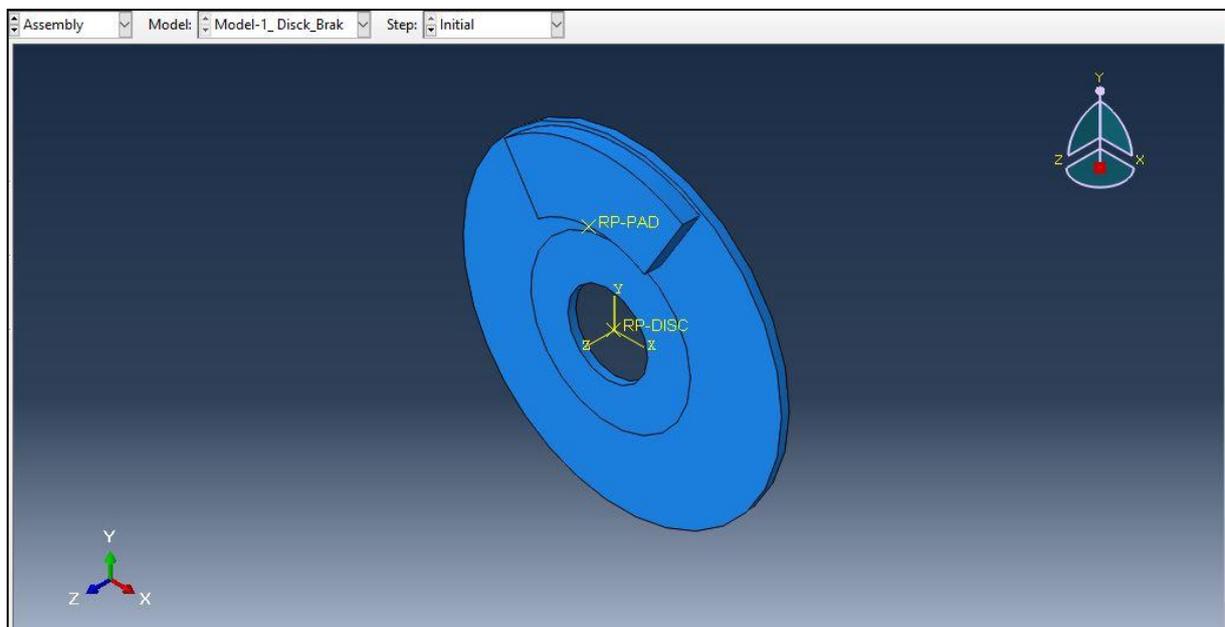


Figure 26. Une assemblée des deux pièces crée (disque plaquette)

III.3 Propriété de matériaux utilisés

Propriétés	Disque	Plaquette
Conductivité (S/m)	48.46	1.212
Densité (Kg.m ⁻³)	7228	2595
Module de YOUNG (GPa)	21	140
Coefficient de poisson (%)	0.24	0.29
Chaleur spécifique (J/kg×C)	419	1465

Tableau 1. Propriété de matériau utilisé

III.4 Les conditions limites et la charge

Dans ce module nous spécifions la valeur de la charge Ensuite, nous créons les conditions aux limites et nous choisissons que le disque tourne autour de l'axe z et la plaquette fixe puis nous définissons la vitesse de rotation (en rad/s), conformément à la figure présentée au-dessous. Enfin, nous définissons la température ambiante du système

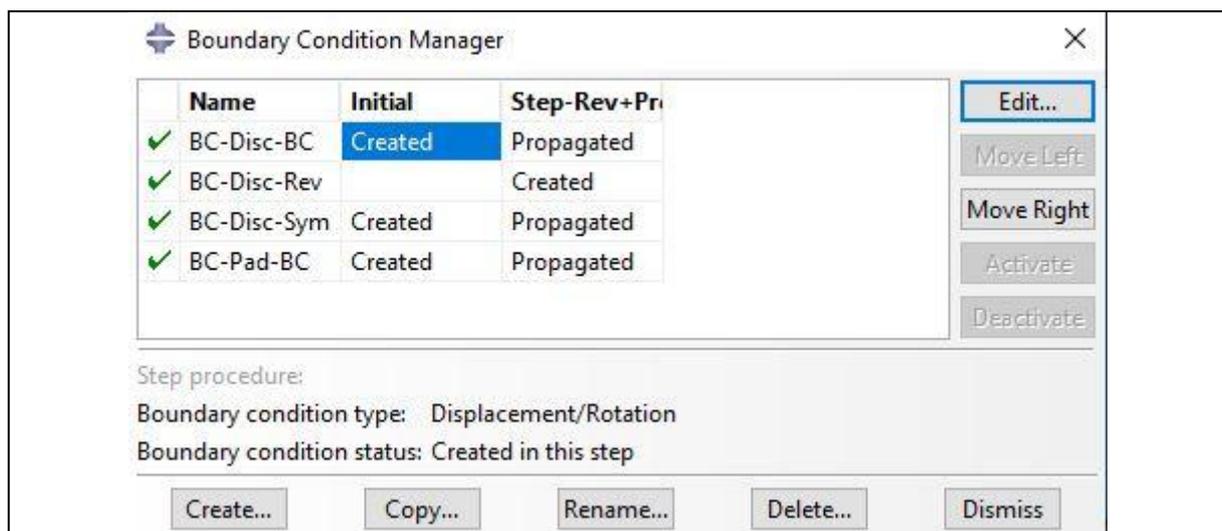


Figure 27. Conditions aux limites de disque et de la plaquette

III.5 Le maillage

Pour créer un maillage, nous suivons les étapes appropriées dans le logiciel et les paramètres qui nous sont nécessaires. Le résultat sera un maillage de la géométrie, comme le montre la figure 28

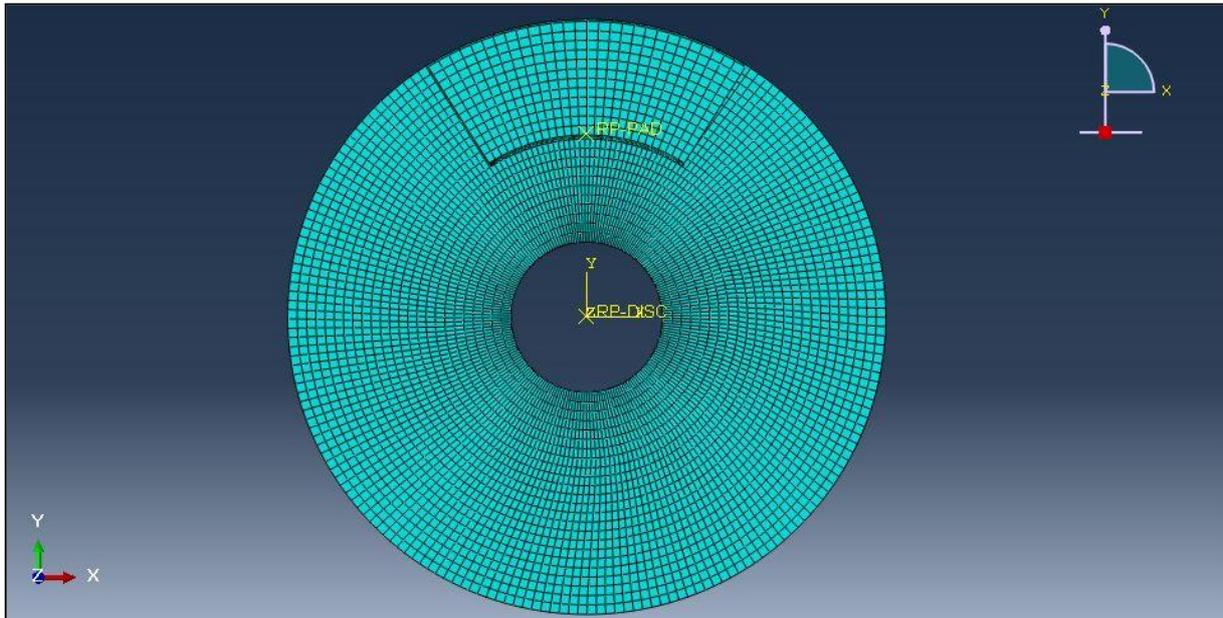


Figure 28.Maillage de la géométrie

La taille de maillage est de 0.004 de type C3D8T : une brique couplée thermiquement à 8 nœuds, déplacement trilineaire et température

Chapitre IV :

Résultats et discussions

IV.1 Résultats et discussion

IV.1.1 Etude Numérique du comportement mécanique du couple disque plaquette sous les conditions de chargement (Cas de pression de 80 Pa et de 1 Rad/s)

La variation de la pression de contact à l'interface Disque-Plaquettes enregistré au moyen du logiciel ABAQUS sous les conditions du chargement indiquer dans le tableau 5

Charge (Pa)	La vitesse (Rad/s)	La température ambiante (degré)
80	1	20

Tableau 2. Paramètres d'essais 1 de frottement

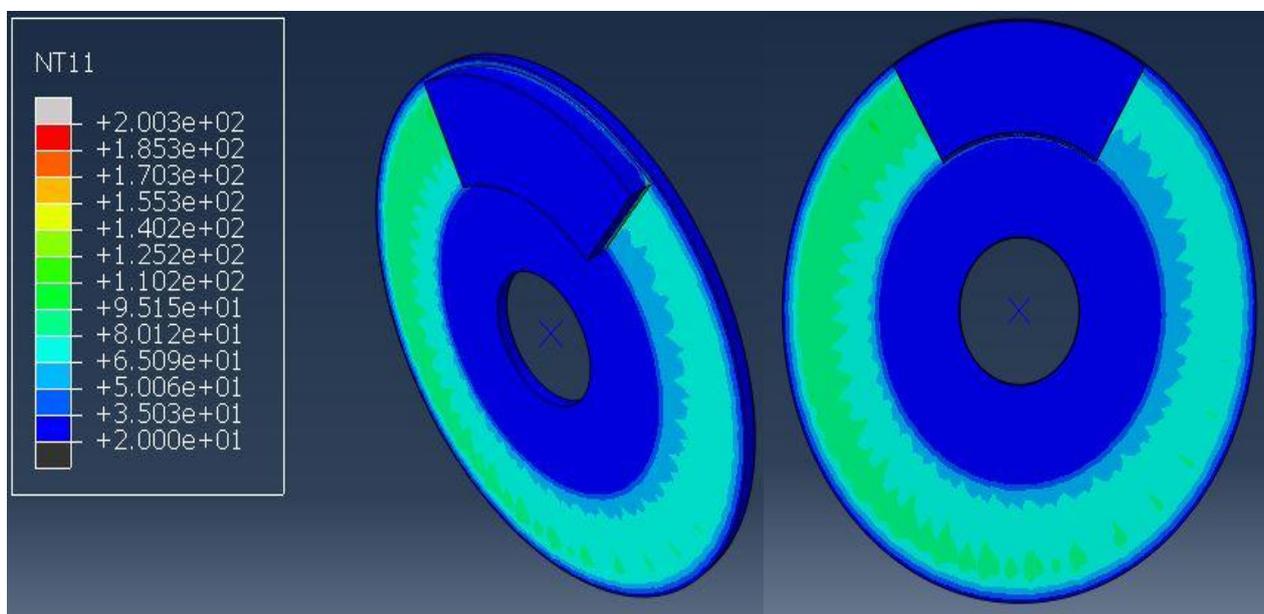


Figure 29. Température des nœuds du disque de l'essai 1

La figure 29 représente la répartition de la température du disque dans la section circulaire qu'il est en contact avec la plaquette, nous observons que la température est répartie dans toutes les zones traversées par la plaque, donc le disque chauffe le maximum à un moment de 1.40s à une température de 200.3°C.

Le contact entre le disque et la plaquette entraîne une usure de la surface de la plaquette, ce qui provoque l'apparition de contraintes sous la surface de cette dernière (figure 29)

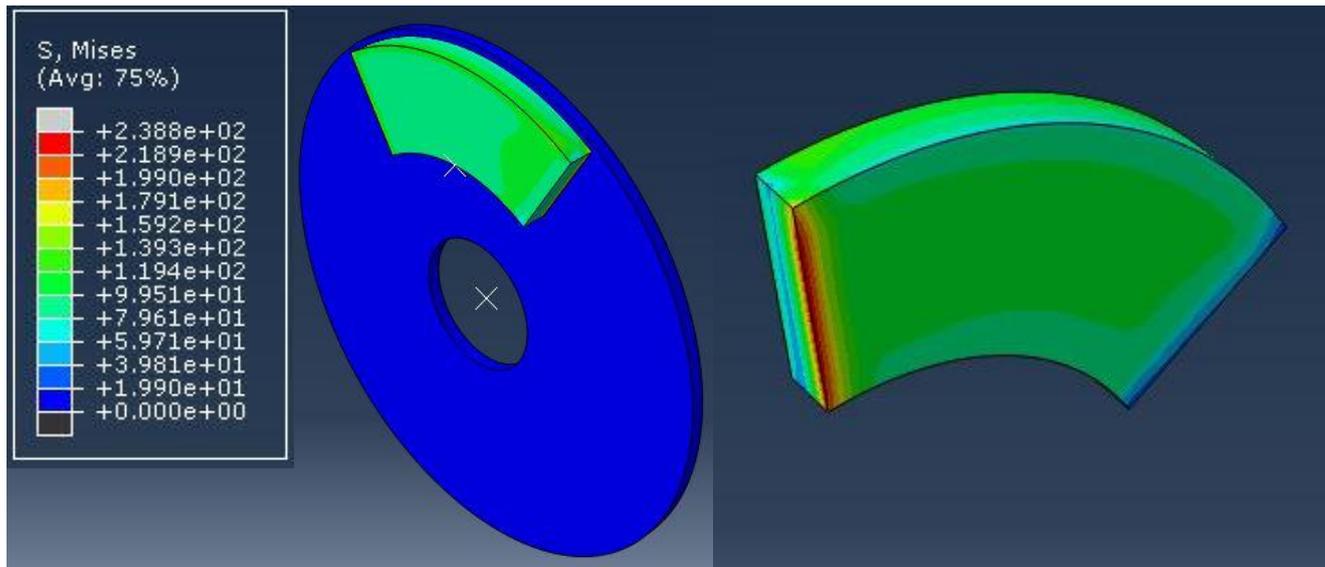


Figure 30. Contraintes VonMises d’essai 1

La Figure 30 présente la contrainte équivalente de Von Mises, qui augmente pendant le frottement entre le disque et la plaquette. Cette contrainte est ensuite appliquée sur la plaquette, atteignant sa valeur maximale qui est équivalent de 238.8 Pa comme le montre la figure.

Dans nos résultats, nous allons présenter un diagramme illustre l’évolution de la pression du disque et de la plaquette (contraintes von mises et tresca) en fonction du temps sous la charge appliquée

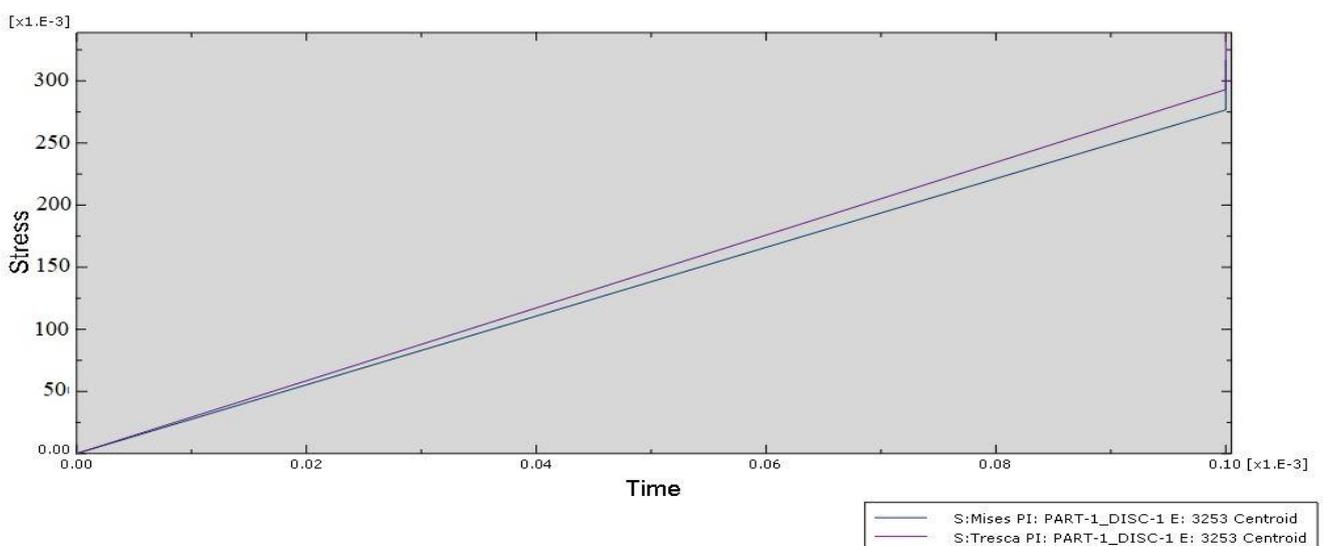


Figure 31: Diagramme des contraintes Von mises et tresca sous la charge de 80 Pa

La figure ci-dessus (31) montre que quand le temps passe, la pression augmentent au fur et à mesure que la vitesse et la charge appliquées sur le disque et la plaquette augmentent, et il montre aussi que la contrainte tresca augmente relativement par rapport à la contrainte von mises au fil du temps

IV.1.2 Etude Numérique du comportement mécanique du couple disque plaquette sous les conditions de chargement (Cas de pression de 150 Pa et de 1 Rad/s)

La variation de la pression de contact à l'interface entre le disque et la plaquette a été enregistrée à l'aide du logiciel ABAQUS, conformément aux conditions de chargement indiquées dans le Tableau 3

la pression (Pa)	la vitesse (rad/s)	La température ambiante (degré)
150	1	20

Tableau 3. Paramètres d'essai 2 de frottement

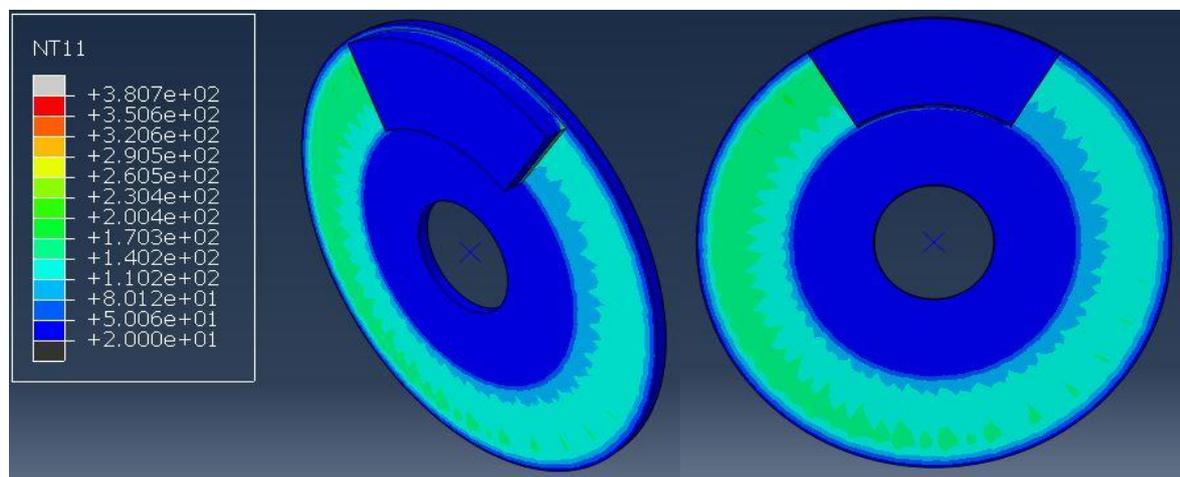


Figure 32. Température des nœuds du disque de l'essai 2

La figure 32 illustre la répartition de la température dans la section circulaire du disque qui est en contact avec la plaquette. Nous pouvons observer que la température se propage dans toutes les zones traversées par la plaquette, ce qui indique que le disque se réchauffe. Plus

spécifiquement, nous constatons que le disque commence à chauffer à un moment précis, à 1.52s à une température de 380.7°C

Ensuite au cadre des contraintes équivalentes nous observons la figure 33

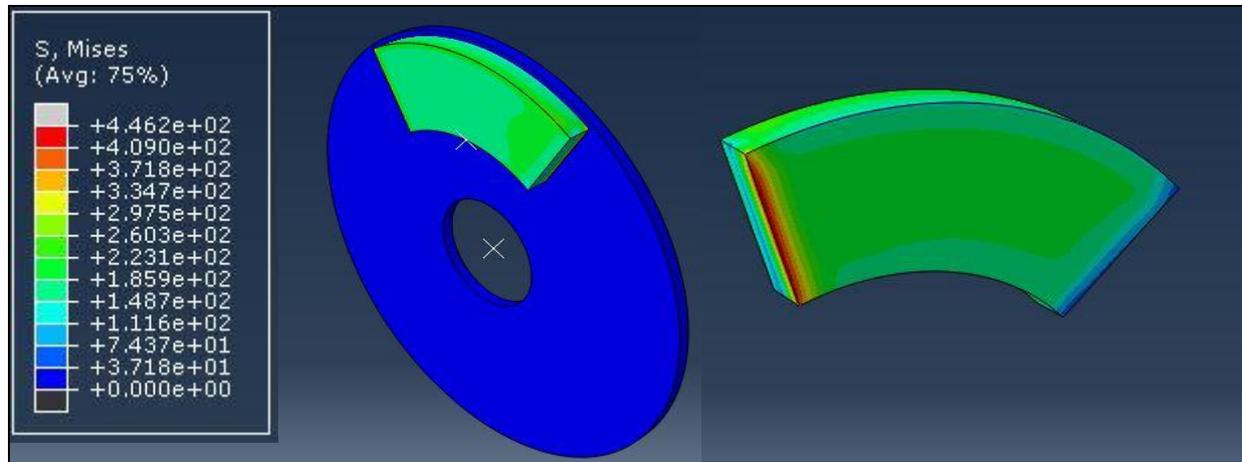


Figure 33. Contraintes VonMises d'essai 2

La figure 33 présente l'évolution de la contrainte équivalente de VonMises lors du frottement entre le disque et la plaquette. Nous pouvons observer que cette contrainte augmente progressivement au fur et à mesure de l'interaction entre les deux surfaces. Finalement, la contrainte atteint une valeur maximale de 446.2 Pa qui est appliquée sur la plaquette

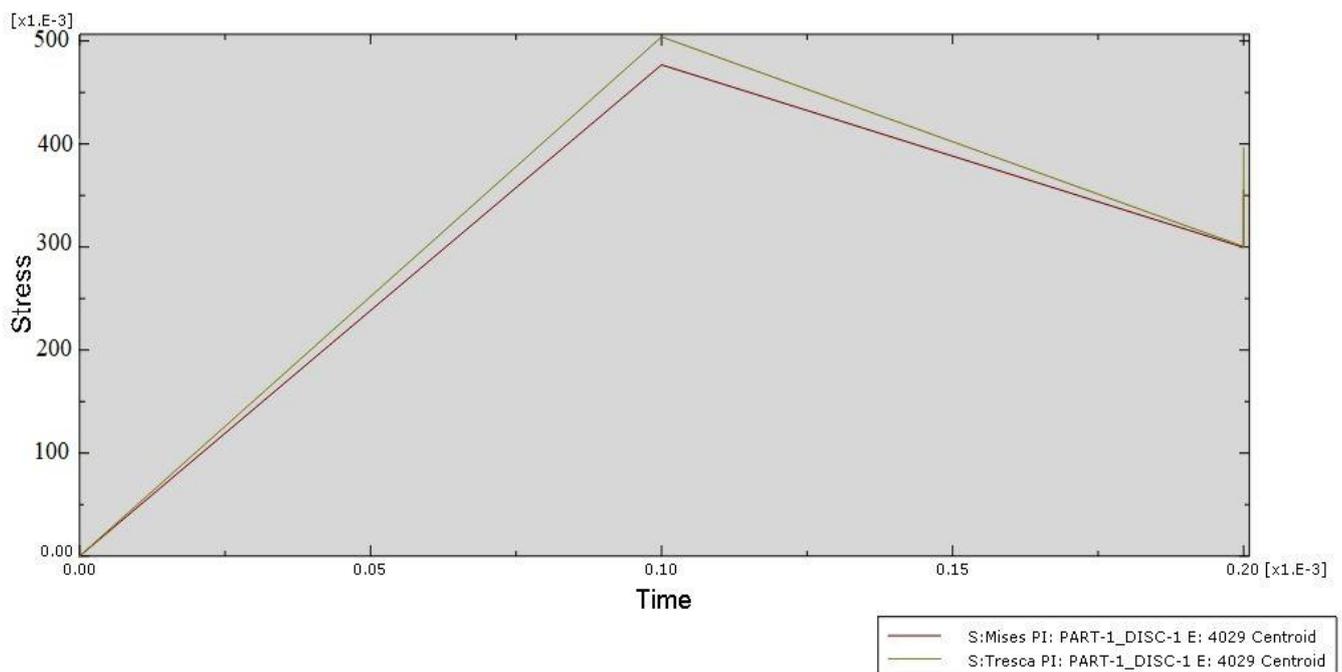


Figure 34: Diagramme des contraintes Von mises et tresca sous la charge de 150 Pa

La figure ci-dessus (34) illustre que, au fil du temps, la pression augmente en parallèle avec la vitesse et la charge exercées sur le disque et la plaquette. Elle met également en évidence que la contrainte de Tresca augmente proportionnellement par rapport à la contrainte de Von Mises au cours du temps et lorsqu'un certain point de l'augmentation, la pression diminue

IV.1.3 Etude Numérique du comportement mécanique du couple disque plaquette sous les conditions de chargement (Cas de pression de 200Pa et de 1 Rad/s)

Dans le cadre de cette étude, nous allons modifier les conditions de chargement comme le montre le tableau 4

La pression (Pa)	La vitesse (rad/s)	La température ambiante (degré)
200	1	20

Tableau 4. Paramètres d'essai 3 de frottement

La figure 35 présente la distribution de la température dans la section circulaire du disque qui entre en contact avec la plaquette.

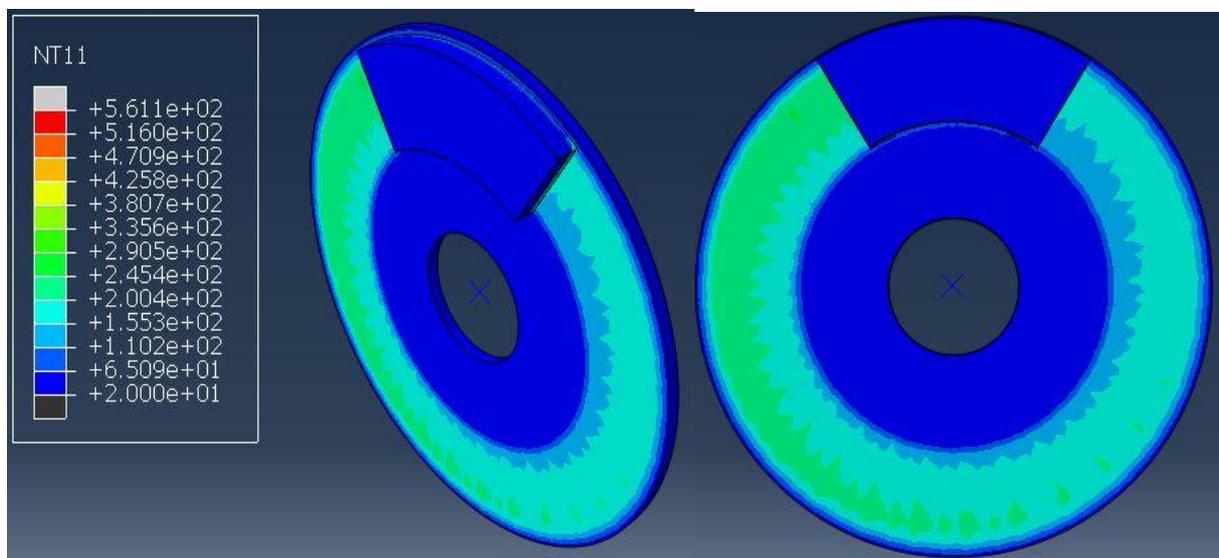


Figure 35. Température des nœuds du disque de l'essai 3

Nous pouvons remarquer que la chaleur se propage dans toutes les zones traversées par la plaquette, ce qui indique que le disque se réchauffe à une température de 561.1°C. Plus précisément, nous observons que le processus de chauffage du disque débute à un moment spécifique de 1.91s

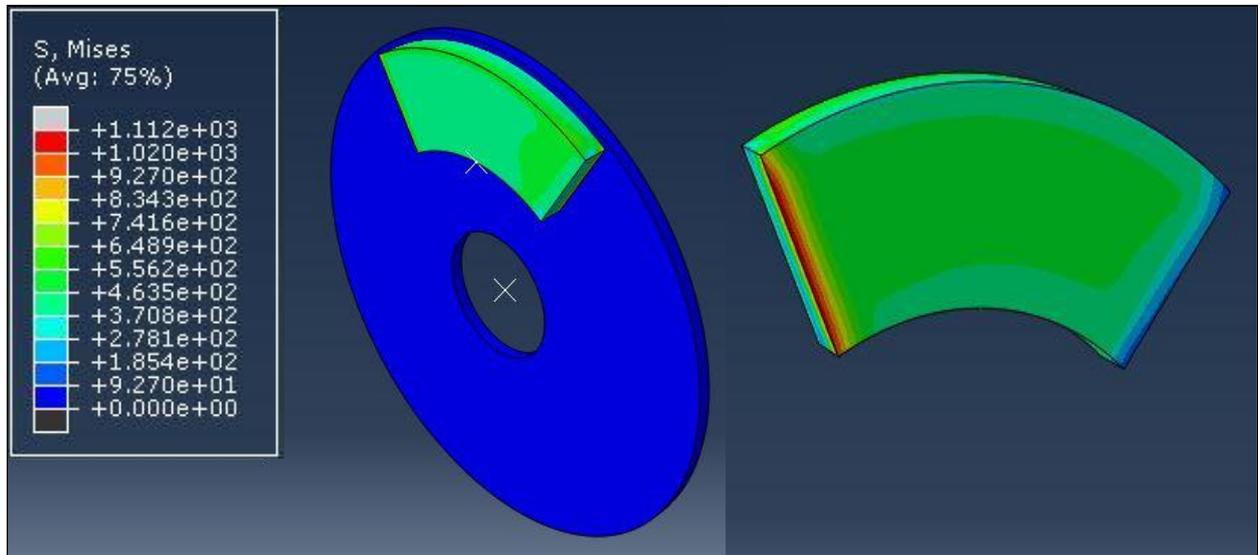


Figure 36. Contraintes VonMises d'essai 3

La figure 36 illustre la variation de la contrainte équivalente de Von Mises lors du frottement entre le disque et la plaquette. Nous pouvons constater que cette contrainte augmente progressivement au cours de leur interaction. En fin de compte, la contrainte atteint une valeur maximale qui s'applique sur la plaquette qui est jusqu'à 1112Pa.

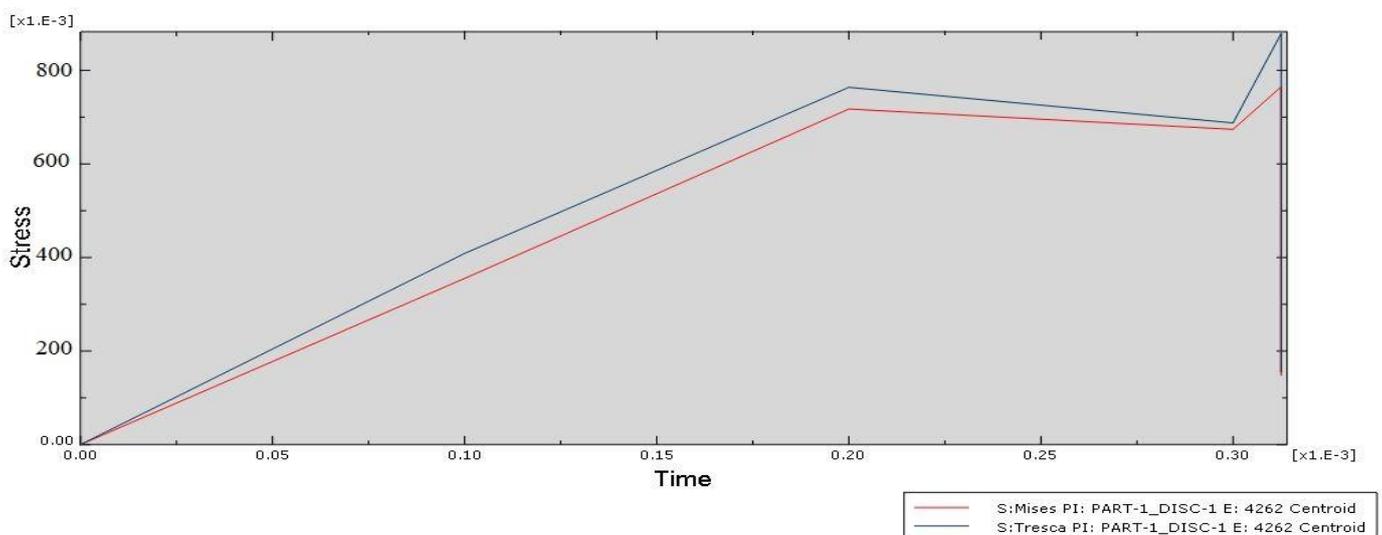


Figure 37: Diagramme des contraintes Von mises et tresca sous la charge de 200 Pa

La figure ci-dessus (37) montre que, avec le temps, la pression augmente en corrélation avec la vitesse et la charge appliquées au disque et à la plaquette. De plus, elle souligne que la contrainte de Tresca croît de manière proportionnelle par rapport à la contrainte de Von Mises au fil du temps.

On résume les résultats des trois essais dans la simulation sur la vitesse (1 Rad/s) dans le tableau suivant :

Température ambiante (°C)	La vitesse (rad/s)	La charge (Pa)	NT11 (°C)	Von mises (Pa)
20	1	80	200.3	238.8
		150	380.7	446.2
		200	561.1	1112

Tableau 5 : les résultats des trois essais de frottement

Nous concluons du tableau ci-dessus que la température et la pression augmentent avec l'augmentation de la vitesse et la charge exercés sur le disque et la plaquette

Conclusion

Pour une meilleure compréhension des phénomènes d'usure à savoir la distribution des contraintes exercés sur les deux surfaces frottantes, la température de contact. La méthode des éléments finis offre une attention particulière au profit des études approfondis portant sur les problèmes de contacts et du frottement de pièces mécaniques. Ces études fournissent une compréhension plus approfondie du comportement thermomécanique, de l'usure et des phénomènes de frottement dans les systèmes de freinage en générale. Elles mettent en évidence l'importance de facteurs tels que la température, la pression de contact, et proposent des approches de modélisation pour prédire et optimiser l'usure des pièces mécanique.

Ce travail porte sur une étude par élément finis de la distribution des champs de contraintes et de la température générée à l'interface de deux pièces de configuration (disque/ broche) en mouvement rotative. L'accent est mis sur l'influence de la pression de contact et de la vitesse de rotation du disque sur l'évolution de la distribution de la température et des contraintes exercés à l'interface des deux surfaces antagonistes.

Les principaux résultats de cette étude soulignent une corrélation entre la pression, la vitesse de rotation et les caractéristiques mécaniques du système de freinage. Une pression plus élevée et des vitesses de rotation plus élevées entraînent une augmentation de la température du disque et une usure accélérée de la plaquette. Ces observations soulignent l'importance de prendre en compte ces facteurs dans la conception et l'optimisation des systèmes de freinage automobile afin de garantir leur performance et leur durabilité.

Références

- [1] Ma, Q., Khan, A. M., & Wang, Q. J. (2020). Dependence of tribological performance and tribopolymerization on the surface binding strength of selected cycloalkane-carboxylic acid additives. *Tribology Letters*, 68, 1-10.
- [2] G. Inglebert, T. D. S. Botelho, et I. L. Caron, « Théorie du contact de Hertz-Contacts ponctuels ou linéiques », *Tech. L'ingénieur*, vol. 33, 2011.
- [3] J. A. Greenwood et J. P. Williamson, « Contact of nominally flat surfaces », *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 295, n° 1442, p. 300-319, 1966.
- [4] M. O. MAACHE, « Etude du comportement tribologique des couches phosphatées au zinc déposées sur l'acier C82D2 destiné pour l'extrusion à », Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie. Amar Laskri. Annaba, 2020.
- [5] B. Arsenault, J.-G. Legoux, et H. Hawthorne, « Slurry erosion of arc-sprayed metal and composite coatings », in *ITSC 1997*, ASM International, 1997, p. 107-112.
- [6] J. Ayel, « Les lubrifiants, moteur et pertes par frottement et usure », *Inst. Fr. Pétrole*, vol. 40, 1979.
- [7] M. C. Dubourg, Y. Berthier, et L. Vincent, « Cracking under fretting fatigue: damage prediction under multiaxial fatigue », *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 37, n° 6, p. 519-533, 2002.
- [8] S. Marwa et T. Ahlam, « Effet de la dureté sur le comportement enfrottement et en usure des couples d'aciers non allié et faiblement allié », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
- [9] F. P. Bowden et D. Tabor, *The friction and lubrication of solids*, vol. 1. Oxford university press, 2001.
- [10] P. Kapsa et M. Cartier, « Usure des contacts mécaniques-Manifestations de l'usure », 2022.
- [11] E. Rabinowicz et R. I. Tanner, « Friction and wear of materials », *J. Appl. Mech.*, vol. 33, n° 2, p. 479, 1966.
- [12] R. Nouailletas, « Modélisation hybride, identification, commande et estimation d'états de système soumis à des frottements secs-Application à un embrayage robotisé », Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [13] H. B. Abdelounis, « Dynamique et vibroacoustique du contact rugueux: expérimentation et modélisation », Ecole Centrale de Lyon, 2010.
- [14] F. P. Bowden et D. Tabor, « The Friction and Lubrication oil Solids Oxford University Press, London », 1950.
- [15] G. Zambelli et L. Vincent, *Matériaux et contacts: une approche tribologique*. Ed. Techniques Ingénieur, 1998.
- [16] N. Khanafi-Benghalem, « Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4 (Etude comparative) », 2018.
- [17] H. Cléménçon, « Abc du graissage », Technical report, Castrol (Switzerland) AG, 2009.
- [18] Benhassine, N., Haiahem, A., & Bou-Said, B. (2019). A comparative study of the transient thermomechanical behavior of friction of the ceramic brake discs: Temperature field effect. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33, 233-240.

- [19] Belhocine, A., Bakar, A. A., & Bouchetara, M. (2014). Numerical modeling of disc brake system in frictional contact. *Tribology in Industry*, 36(1), 49.
- [20] Bose, K. K., & Ramkumar, P. (2018). *Finite element sliding wear simulation of 2D steel-on-steel pin-on-disc tribometer* (No. 2018-28-0011). SAE Technical Paper.
- [21] Vijay, R., Kumar, V. A., Sadiq, A., & Pillai, R. R. (2021, February). Numerical analysis of wear characteristics of zirconia coated aluminum 6061 alloy. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1059, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.

Résumé :

L'objectif de l'étude et de simulation de différents types de contact est d'analyser et de comprendre les phénomènes tribologiques qui se produisent lors de l'interaction de surfaces en contact. Cela permet de mieux appréhender les mécanismes de frottement, d'usure et de lubrification dans diverses applications, telles que les systèmes de freinage, Ce résumé porte sur une étude réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis pour analyser les phénomènes d'usure, les contraintes exercées et la distribution de la température à l'interface de deux pièces en mouvement rotatif, telles qu'un disque et une broche. L'objectif était de comprendre l'influence de la pression de contact et de la vitesse de rotation du disque sur ces paramètres

Mots clés :Disque de Freinage ; Frottement ; Simulation Numérique ; Usure

Abstract :

The aim of studying and simulating different types of contact is to analyze and understand the tribological phenomenon that occurs when surfaces interact. This enables a better understanding of friction, wear and lubrication mechanisms in various applications, such as braking systems, This abstract reports on a study carried out using the finite element method to analyze wear phenomena, exerted stresses and temperature distribution at the interface of two rotating parts, such as a disk and a spindle. The aim was to understand the influence of contact pressure and disk rotation speed on these parameters.

Keywords:Disc Brake; Friction; Numerical Simulation; Wear

ملخص:

الهدف من دراسة ومحاكاة أنواع مختلفة من الاتصال هو تحليل وفهم الظواهر الترابيولوجية التي تحدث عندما تتفاعل الأسطح. يتيح ذلك فهمًا أفضل لآليات الاحتكاك والتآكل والتشحيم في تطبيقات مختلفة، مثل أنظمة الكبح، هذا التقرير الملخص عن دراسة تم إجراؤها باستخدام طريقة العناصر المحدودة لتحليل ظواهر التآكل والضغط المبذولة وتوزيع درجة الحرارة في واجهة دائرتين. أجزاء، مثل القرص والمغزل. كان الهدف هو فهم تأثير ضغط التلامس وسرعة دوران القرص على هذه المعلمات.

كلمات مفتاحية: قرص الفرامل. احتكاك؛ محاكاة رقمية؛ التآكل