

République Algérienne Démocratique et Populaire  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département de Génie Mécanique

# Projet de Fin d'Études

*Pour l'obtention du diplôme de Master  
En Génie Mécanique  
Option Energétique*

## Thème

**Étude du comportement tribothermique d'un  
contact dynamique pion disque**

**Les membres du jury :**

**M. Dr. A. BOUROUIS**

**M. Dr. N. ADERGHAL**

**M. Dr. S. SAADI**

*Président*

*Encadreur*

*Examineur*

**Présenté par :**

**LEBDAL Yasser**

**BOUGHELEM Ali**

**Promotion 2020**

**Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel  
Soutenu le 26/10/2020**



# Remerciements

Après avoir rendu grâce à Dieu le Tout Puissant et le Miséricordieux nous Tenons à remercier et à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, **Dr. N. Aderghal** pour son suivi et ses judicieux conseils et sa disponibilité.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements aux membres des jurys **Dr. S. Saadi** et **Dr. A. Bourouis** pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Nous ne laisserons pas cette occasion passer sans remercier nos camarades de promotion pour la solidarité et le soutien tout au long de ces années passer ensemble.

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents*

*Mes frères et mes sœurs*

*Et toute ma famille*

*Mes amis et mes collègues*

*Et tous les énergéticiens*

*LEBDAI Yasser*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents*

*Mes frères et mes sœurs*

*Et toute ma famille*

*Mes amis et mes collègues*

*Et tous les énergéticiens*

*BOUGHELEM Ali*

# Sommaire

Introduction générale.....1

## Chapitre I : Généralité sur la tribologie

**I.1.Introduction.....4**

**I.2. La tribologie.....5**

I.2.1. Définition.....5

I.2.2. Système tribologie.....5

I.2.3. Rôle du troisième corps.....5

**I.3.Frottement.....6**

I.3.1.Définition.....6

I.3.2.Importance de frottement.....6

I.3.3. La théorie de frottement.....6

I.3.4.Frottement statique et dynamique (cinétique).....7

I.3.5. Température de frottement.....8

**I.4. Usure.....8**

I.4.1. Définition.....8

I.4.2. Evolution de l'usure.....9

I.4.3. Les origines de l'usure.....10

I.4.4. Types d'usure.....10

I.4.4.1. L'usure adhésive.....10

I.4.4.2.L'usure abrasive.....11

## Sommaire

---

I.4.4.3. L'usure par fatigue.....	11
I.4.4.4. L'usure de corrosion.....	12
I.4.4.5. Usure par érosion.....	12
I.4.5. Type secondaires d'usure.....	13
<b>I.5. Généralités.....</b>	<b>13</b>
I.5.1. Acier.....	13
I.5.2. Types des aciers.....	14
I.5.3. Le cuivre.....	15

## Chapitre II : Présentation de la partie expérimentale et modélisation numérique

<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>16</b>
<b>II.2. Montage expérimentale.....</b>	<b>16</b>
II.2.1. Présentation du tribomètre pion-disque.....	16
<b>II.3. Dimensions et géométries des éléments du couple tribologique.....</b>	<b>17</b>
II.3.1. Disque.....	17
II.3.2. Pion.....	18
<b>II.4. Moyens de mesure.....</b>	<b>18</b>
II.4.1. Mesure du coefficient de frottement.....	18
II.4.2. Mesure de l'usure du pion.....	18
II.4.3. Mesure de la température.....	19
<b>II.5. Caractéristiques des matériaux.....</b>	<b>20</b>
II.5.1. Matériaux du pion Cuivre (Cu).....	20

## Sommaire

---

<b>II.5.1.1. Compositions chimiques.....</b>	<b>20</b>
II.5.1.2. Caractéristiques mécaniques.....	20
II.5.1.3. Propriétés physiques.....	20
<b>II.5.2. Matériau du disque acier C45 (XC48).....</b>	<b>20</b>
II.5.2.1. Compositions chimiques.....	20
II.5.2.2. Caractéristiques mécaniques.....	21
II.5.2.3. Propriétés physiques.....	21
<b>II.6. Modélisations numérique.....</b>	<b>21</b>
II.6.1. Introduction.....	21
II.6.2. Hypothèses.....	22
II.6.3. Equations physiques et conditions aux limite.....	22
II.6.4. Détermination de flux de chaleur total généré par frottement.....	23
II.6.5. Détermination du coefficient de partage du contact pion-disque.....	24
II.6.6. Résolution sur COMSOL.....	25
II.6.7. La géométrie utilisée.....	25
II.6.8. Le maillage.....	26

## Chapitre III : Résultats et discussion

<b>III.1.Introduction.....</b>	<b>27</b>
<b>III.2.Résultats expérimentaux.....</b>	<b>27</b>
III.2.1. Influence de la charge normale et de la vitesse de glissement.....	27
III.2.2. Influence des conditions ambiantes sur la perte de masse.....	30

## Sommaire

---

III.2.3. Variation de la perte de masse en fonction du flux échangé pour différentes charge et vitesse.....	31
<b>III.3. Partie numérique.....</b>	<b>32</b>
III.3.1.Régime stationnaire.....	32
III.3.1.1.Température de surface.....	32
III.3.1.2. Variation de la température suivant la profondeur.....	33
III.3.2.Régime transitoire.....	35
<b>III.4.Evolution du coefficient de partage en fonction de la charge et de la vitesse de glissement.....</b>	<b>36</b>
<b>III.5. Comparaison.....</b>	<b>37</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>39</b>

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1.</b> Schéma d'un tribosystème.....	5
<b>Figure I.2.</b> Contact entre deux solides en présence de frottement.....	7
<b>Figure I.3.</b> Diagramme de frottement statique et dynamique.....	8
<b>Figure I.4.</b> Les phases principales d'usure.....	9
<b>Figure I.5.</b> Différents, modes d'usure, présents dans l'industrie.....	10
<b>Figure I.6.</b> Usure adhésive.....	11
<b>Figure I.7.</b> Usure abrasive.....	11
<b>Figure I.8.</b> Usure par fatigue.....	12
<b>Figure I.9.</b> Usure de corrosion.....	12
<b>Figure I.10.</b> Usure d'Erosion.....	12
<b>Figure I.11.</b> Comportement ductile.....	13
<b>Figure I.12.</b> Comportement fragile.....	13

### Chapitre II

<b>Figure II.1.</b> Vue d'ensemble du tribomètre.....	17
<b>Figure II.2.</b> Dessin de définition du disque.....	17
<b>Figure II.3.</b> Dessin de définition du pion.....	18
<b>Figure II.4.</b> Microbalance de précision $10^{-5}$ g.....	19
<b>Figure II.5.</b> Thermomètre infrarouge.....	19
<b>Figure II.6.</b> Conditions aux limites imposées.....	23

## Liste des figures

---

**Figure II.7.** Position des deux points choisis sur le pion.....24

**Figure II.8.** Géométrie du contact pion-disque en 3D.....25

**Figure II.9.** Maillage du contact pion-disque.....26

## Chapitre III

**Figure III.1.** Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale.....27

**Figure III.2.** Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement.....28

**Figure III.3:** Variation de la perte de masse en fonction de la charge normale.....28

**Figure III.4:** Variation de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.....29

**Figure III.5:** Variation de densité de flux en fonction de la charge normale.....29

**Figure III.6:** Variation de la densité de flux en fonction de la vitesse de glissement.....30

**Figure III.7.** Variation de la température et la perte de masse en fonction de la charge normale ( $V=0,5$  m/s) et la vitesse de glissement ( $P=20$  N).....30

**Figure III.8.** Variation de l'humidité ambiante et la perte de masse en fonction de la charge normale ( $V=0,5$  m/s) et la vitesse de glissement ( $P=20$ N).....31

**Figure III.9.** Variation de la perte de masse et la densité de flux en fonction de la charge normale ( $V=0,5$  m/s) et la vitesse de glissement ( $P=20$  N).....32

**Figure III.10:** Evolution de la température de surface d'un contact Cuivre-Acier.....33

**Figure.III.11 :** Evolution de la température suivant la profondeur du contact pion disque.....34

## Liste des figures

---

- Figure.III.12** : Cartographies de la température suivant la profondeur du contact pion disque.....**35**
- Figure III.13:** Cartographies des températures de surface du disque,  $V=0,5\text{m/s}$  et  $P =20\text{N}$ ,  $t= (0.001\text{s}, 0.01\text{s}, 0.1\text{s}, 1\text{s et } 5\text{s})$ .....**36**
- Figure III.14.**Variation du coefficient de partage côté pion et côté disque en fonction de vitesse de glissement (m/s).....**37**
- Figure III.15** : Variation de la température numérique et expérimentale en fonction du temps ( $P=20\text{ N}$ ,  $V=0,1\text{m/s}$ ,  $0,2\text{ m/s}$  et  $0,3\text{ m/s}$ ).....**38**

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1.</b> Compositions chimiques de cuivre.....	<b>20</b>
<b>Tableau II.2.</b> Caractéristiques mécaniques de cuivre.....	<b>20</b>
<b>Tableau II.3.</b> Propriétés physiques de cuivre.....	<b>20</b>
<b>Tableau II.4.</b> Compositions chimiques de l'acier C45.....	<b>20</b>
<b>Tableau II.5.</b> Caractéristiques mécaniques de l'acier C45.....	<b>21</b>
<b>Tableau II.6.</b> Propriétés physiques de l'acier C45.....	<b>21</b>
<b>Tableau II.7.</b> Choix du maillage.....	<b>26</b>
<b>Tableau III.1.</b> Position de la température de surface maximale.....	<b>32</b>
<b>Tableau III.2.</b> Valeurs du coefficient de partage du contact pion-disque en fonction des différentes charges ( $V=0.5\text{m/s}$ ).....	<b>37</b>

# Nomenclature

**A** : La surface de contact [ $m^2$ ]

**A%** : L'allongement pourcentage

**Cp** : La chaleur spécifique [ $J.Kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ]

**Cu** : Le cuivre

**C** : symbole non allié

**Cr** : chrome

**dT** : L'écart de température [ $^{\circ}C$ ]

**dm**: L'usure (perte de masse) [mg]

**Ft** : La force tangentielle de frottement [N]

**Fn** : La force normal [N]

**h** : Le coefficient de convection [ $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ ]

**mf** : Masse finale du pion [mg]

**mi** : Masse initiale du pion [mg]

**Mo**: molybdène

**Ni** : Nickel

**P** : La charge normale [N]

**qt** : La densité de flux généré [ $W.m^{-2}$ ]

**T** : La température [ $^{\circ}C$ ]

**t** : Le temps [s]

**V** : La vitesse de glissement [ $m.s^{-1}$ ]

**X** : symbole acier frottement allié

## Nomenclature

---

$\lambda$  : La conductivité thermique [  $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$  ]

$\Phi$  : Le flux de chaleur totale [W]

$\rho$  : La masse volumique [  $Kg.m^{-3}$  ]

$\mu$  : Le coefficient de frottement

$\mu_D$  : Le coefficient de frottement dynamique

$\mu_S$  : Le coefficient de frottement statique

$\gamma_d$  : Coefficient de partage pour le disque

$\gamma_p$  : Coefficient de partage pour le pion

# **Introduction générale**

### Introduction générale:

La tribologie est une science qui s'intéresse aux frottements des surfaces qui sont en contact lors d'un mouvement relatif. Elle englobe l'étude de l'usure et la lubrification.

Le frottement et l'usure sont des phénomènes qui jouent un rôle très important dans le comportement tribologique des matériaux des différents dispositifs industriels, tels que le système de freinage automobile et ferroviaire, des guidages en rotation comme les roulements et paliers lisses, ou en translation, de la transmission de puissance par obstacle ou par friction et beaucoup d'autres systèmes.

Le comportement tribologique des surfaces frottantes qui en résulte durant le fonctionnement se traduit par des modifications géométriques, transformations physicochimiques, des enlèvements de matière ou encore par une élévation de température. Plusieurs paramètres jouent un rôle primordial dans le comportement tribologique des couples, tels que, la charge normale appliquée, la vitesse de glissement, la nature des matériaux utilisés et leurs états métallurgiques. Ils ont une influence significative sur la dureté, la microstructure des couples de matériaux et peut influencer aussi sur le taux d'usure des matériaux et par conséquent sur la fiabilité et la durée de vie de fonctionnement du système industriel [1].

A ce propos, plusieurs travaux ont été réalisés.

Palanikumar et al. [2] ont étudié expérimentalement l'effet de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement et la température à l'interface d'un contact glissant SS304 (Stainless Steel - Grade 304). Ils ont trouvé que le coefficient de frottement diminue avec la vitesse de glissement. La température due au frottement a été mesurée à l'aide des thermocouples de type K. Les résultats obtenus ont montrés que la température augmente avec la vitesse de glissement.

Yunpeng et al. [3] ont présenté une analyse expérimentale du coefficient de frottement d'un contact de glissement roue/rail en régime transitoire en utilisant un pendule en acier. Ils ont développé une formule pour le calcul du coefficient de frottement qui ne dépend pas des caractéristiques et des paramètres thermiques du matériau du contact glissant.

Bekouche et al. [4] ont étudié expérimentalement l'effet de la charge normale sur le comportement de coefficient de frottement et la perte de masse du couple tribologique bronze-acier. Ils ont réalisés cette étude par un tribomètre pion-cylindre. Ils ont trouvés que la charge normale a une influence importante sur le comportement tribologique du couple,

## Introduction générale

---

l'augmentation de la charge normale provoque une diminution de coefficient de frottement par contre la perte de masse (usure) augmente.

M. Belatreche, et [5] ont étudié expérimentalement et numériquement le comportement thermique et mécanique des couples tribologiques : acier-acier et laiton-acier d'un système pion sur un cylindre sous l'influence des deux paramètres : charge normale et vitesse de glissement avec un coefficient de frottement constant. Les deux méthodes ont permis de suivre l'évolution de la température du pion et de déterminer l'usure qui en résulte en deux régimes : stationnaire et transitoire. Ils ont trouvés que les deux paramètres : charge appliquée et vitesse de rotation ont une influence significative sur la variation de la température au niveau de l'interface de contact. Ils ont pu quantifier la perte de masse et montrer sa relation avec l'évolution de la température.

Y. Soufane et A. Bouassria [6] ont étudié expérimentalement le comportement tribologique du contact d'un disque en acier en rotation contre un pion en cuivre, en laiton et en bronze sous l'influence des deux paramètres : charge normale et vitesse de glissement dans des conditions atmosphériques normales. Ils ont suivis l'évolution de la température du pion, la variation du coefficient de frottement et l'usure qui en résulte en deux régimes : stationnaire et transitoire. Ils ont montrés l'effet des deux paramètres : charge appliquée et vitesse de rotation sur la variation de la température du pion et sa perte de masse.

Le but primordial de notre étude est de suivre expérimentalement et numériquement l'influence des paramètres thermiques et mécaniques sur l'usure du pion en cuivre en contact dynamique avec un disque en acier.

Le plan du mémoire se décompose en trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur la tribologie et aussi le processus de l'usure et le frottement avec des généralités sur les matériaux utilisés dans ce travail.

Dans le deuxième chapitre, on a exposé le tribomètre utilisé, les dimensions et la géométrie du contact pion-disque. Une introduction sur la modélisation numérique en utilisant le code de calcul COMSOL MULTIPHYSICS, les conditions aux limites ainsi que la détermination du coefficient de partage.

Au troisième chapitre, on a présenté et interpréter les résultats expérimentaux et numériques de la température du pion, le flux de chaleur généré par frottement, le coefficient de frottement ainsi que la perte de masse du pion en cuivre pour des vitesses de glissement

## **Introduction générale**

---

(0.1~0.5 m/s) et charge normale (5N ~20 N) dans les deux régimes stationnaire et transitoire. A la fin de ce chapitre, on a effectué une comparaison entre les deux résultats numériques et expérimentaux de la température du pion.

Nous achevons notre travail par une conclusion générale qui inclut l'essentiel des résultats obtenus.

# **Chapitre I:**

## **Généralités sur la tribologie**

**I.1.Introduction:**

Le nom tribologie a été créé en Angleterre. Il a été utilisé pour la première fois le 23 novembre 1965 au Ministre d'État pour l'éducation et de la science et publié en février 1966 [7].

Ce nom vient du Grec Tribein: frotter et logos: parole, étude ou science; ainsi la tribologie est l'étude ou la science, du frottement. Plus généralement, la tribologie regroupe l'étude de la lubrification, du frottement et de l'usure des éléments de machine [8].

De la préhistoire à nos jours, l'homme a toujours cherché à réduire les frottements et à éviter l'usure. Le bitume a été utilisé depuis l'Antiquité pour réduire les frottements dans les axes des roues de potier. Les premiers paliers fabriqués par l'homme étaient les crapaudines de portes constitués d'un axe en bois tournant à l'intérieur d'un creux pratiqué dans du bois ou dans une pierre. Des lubrifiants ont été utilisés pour faciliter le transport de charges lourdes. Plusieurs bas-reliefs montrent cette méthode de transport. Le plus ancien provient de la tombe de Saqqara et date de 2400 ans avant J. C. et montre le déplacement de la statue de Ti. Le mécanicien Léonard de Vinci est connu par sa sculpture et son dessin. Son travail sur le frottement et les machines a été utilisé plus de deux siècles après sa mort [8].

Ce chapitre traite le contact tribologique et aussi le processus de l'usure et le frottement avec des généralités sur les matériaux utilisés dans notre étude.

Le frottement et l'usure jouent un rôle très important dans le comportement tribologique des matériaux de dispositifs industriels.

## I.2. La tribologie:

### I.2.1. Définition:

La tribologie est la science des surfaces solides en interaction dans un mouvement relatif. Elle traite les problèmes de lubrification, de frottement et d'usure.

### I.2.2. Système tribologie:

On définit un contact tribologique ou tribosystème comme étant composé de trois éléments principaux (Figure I.1):

- Deux solides A et B qui sont en contact : les premiers corps
- Le milieu interfacial (I) désigné sous le terme de troisième corps
- Le milieu ambiant (E) sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de celles des premiers corps.

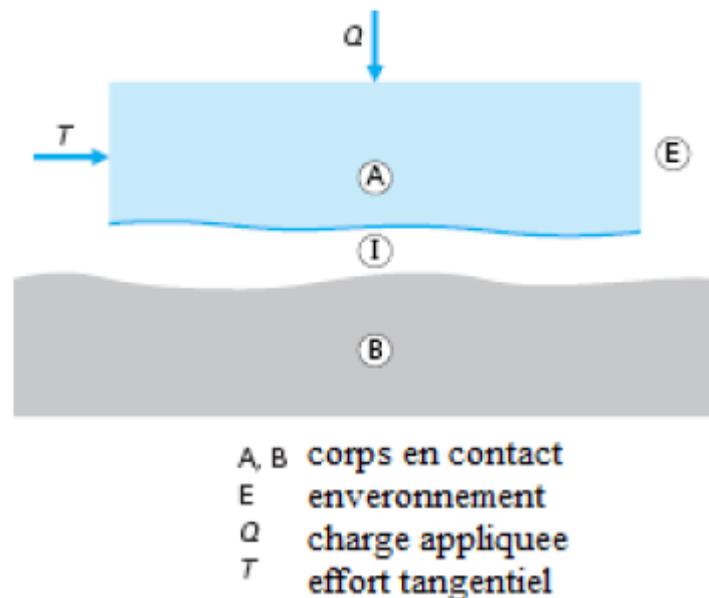


Figure I.1. Schéma d'un tribosystème [9].

### I.2.3. Rôle du troisième corps :

Le troisième corps est défini comme la zone où la composition chimique est différente de celle des premiers corps, et l'épaisseur dans laquelle la différence de vitesse entre les premiers corps est accommodée, ce qui met en avant son caractère lubrifiant. Ce milieu interfacial permet aussi la séparation totale ou partielle des premiers corps.

**I.3.Frottement :****I.3.1.Définition :**

Le frottement est une ‘résistance’ freinant tout mouvement relatif entre deux solides qui sont en contact. L’effort qui tend à ralentir ce mouvement est appelé ‘effort de frottement’, il est de sens opposé au déplacement. Il se manifeste par une dissipation d’énergie thermique entre les deux corps en contact glissant [10].

Le frottement est caractérisé généralement par le coefficient de frottement ( $\mu$ ) qui représente la résistance au déplacement de la force tangentielle ( $F_t$ ) sur la portance global( $F_n$ ) [11].

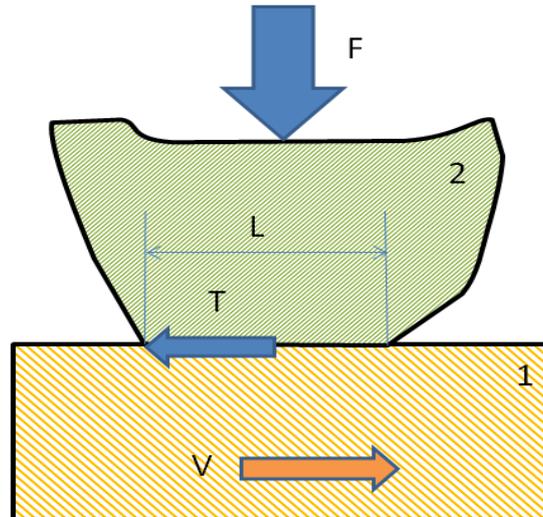
**I.3.2.Importance de frottement :**

Le frottement à une importance pratique évidente, il est à l’origine des phénomènes d’usure décrit par la suite. Il transmet une force tangentielle à la surface de contact entre deux solides serrés l’un contre l’autre. Dans un premier temps, les solides restent en immobilité relative, au-delà d’une certaine intensité de la force, ils glissent. Le glissement dissipe de l’énergie et use les surfaces. Par ailleurs parce qu’il entrave le libre mouvement aux interfaces, le frottement peut significativement affecter le fluage et la déformation du matériau dans de nombreux procédés d’utilisations des métaux [12].

Le frottement ne devrait pas être toujours comme indésirable, sa présence nécessaire pour le succès ou l’optimisation de nombreuses opérations [12].

**I.3.3. La théorie de frottement :**

Lorsque deux solides 1 et 2 sont mis en contact par une force  $F$ , une force tangentielle  $T$  apparaît naturellement si on cherche à déplacer les solides l’un par rapport à l’autre. Cette force tangentielle est appelée force de frottement.



**Figure I.2.** Contact entre deux solides en présence de frottement [13].

Les premiers travaux que l'on connaît sur le frottement sont ceux de Léonard de Vinci au début du 16<sup>ème</sup> siècle. Mais, il faut attendre 200 ans pour que ces travaux aient un statut académique. En effet, Amontons, en 1699, puis Coulomb, en 1785, ont été les premiers à formuler les lois du frottement solide que nous connaissons actuellement [13].

1. Amontons (1699) :  $f$  est indépendant de  $F$  ;
2. Amontons (1699) :  $f$  est indépendant de l'aire apparente de contact  $A$
3. Coulomb (1785) :  $f$  est indépendant de la vitesse de glissement.

#### **I.3.4. Frottement statique et dynamique (cinétique) :**

Le frottement statique repose sur les mêmes mécanismes que le frottement dynamique mais est généralement plus élevé. En effet, les forces adhésives ont tendance à augmenter avec le temps de contact en raison de mécanismes à plus long terme comme la diffusion solide. Ceci conduit à une augmentation de la contribution adhésive au frottement.

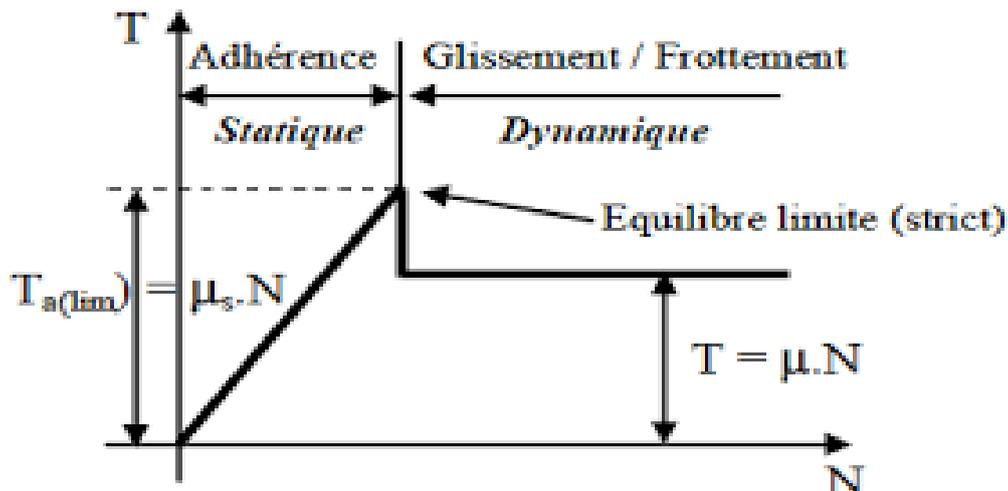


Figure I.3. Diagramme de frottement statique et dynamique [14].

### I.3.5. Température de frottement:

La température peut fortement influencer les propriétés de surface des matériaux en glissement, favorise des transformations physico-chimiques et microstructurales et modifier la rhéologie des éléments inter faciaux présents dans le contact. L'énergie générée par le frottement de deux corps solides est convertie en chaleur [15].

### I.4. Usure:

#### I.4.1. Définition:

D'une manière générale, on appelle usure la détérioration d'une surface solide. L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables.

L'usure dépend d'un grand nombre de paramètres, les plus importants sont :

- ✓ Le mode de contact.
- ✓ La charge.
- ✓ La vitesse.
- ✓ La lubrification.
- ✓ Les traitements de surface.

- ✓ Etat de surface.
- ✓ Coefficient de frottement.

L'usure peut être évaluée de plusieurs manières:

- Quantité de matière perdue par unité de distance parcourue.
- Quantité de matière perdue par unité de temps.
- Quantité de matière perdue par tour ou oscillation.

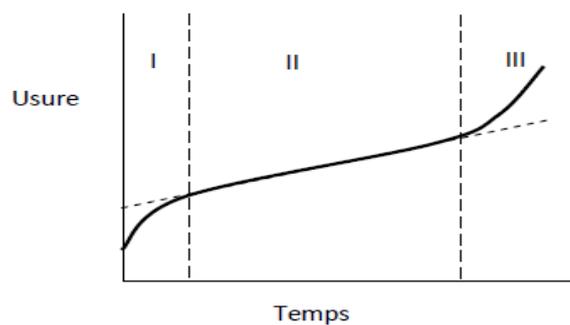
Les résultats sont donnés sous forme de masse, volume ou épaisseur.

Les études sur l'usure font généralement intervenir un grand nombre de facteurs [16] :

- mode de contact
- état de surface
- vitesse
- charge

#### I.4.2. Evolution de l'usure:

En général, on distingue trois phases dans l'usure d'une pièce soumise au frottement:



**Figure I.4.** Les phases principales d'usure [17].

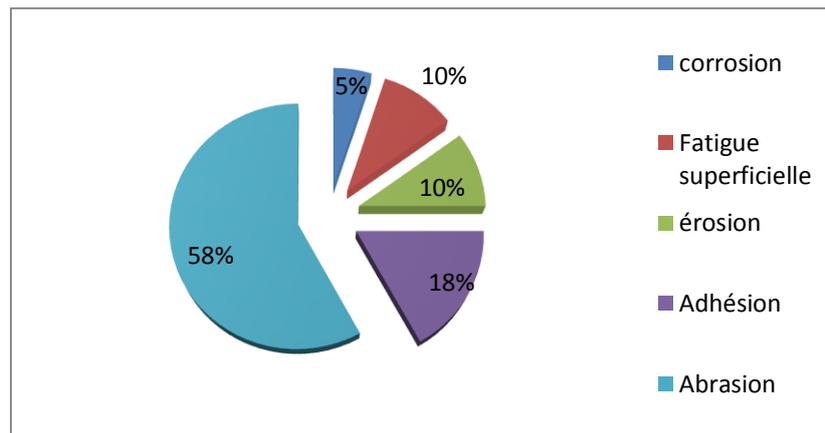
- **La Phase 1:** usure rapide (rodage). Elle représente l'adaptation des surfaces en contact.
- **La Phase 2:** utilisation normale de la machine. Elle représente un régime d'usure stationnaire.
- **La Phase 3:** destruction des éléments de la machine.

#### I.4.3. Les origines de l'usure [18]:

- Les déformations plastiques;
- La fissuration;
- Les transformations physico-chimiques des surfaces;
- Adhésion : transfert à l'échelle atomique, grippage, micro grippage.

#### I.4.4. Types d'usure:

Il existe cinq types d'usure:



**Figure I.5.** Différents, modes d'usure, présents dans l'industrie.

##### I.4.4.1. L'usure adhésive:

C'est le type le plus couramment rencontré, le matériau d'une pièce est transféré et solidement soudé sur l'autre, les pièces peuvent être immobilisées par grippage. Est souvent engendrée, soit par un mécanisme mécanique, soit par une réaction physico-chimique, entre les surfaces en contact.



**Figure I.6.** Usure adhésive [19].

#### **I.4.4.2. L'usure abrasive:**

L'usure abrasive est un phénomène mécanique qui représente l'endommagement des surfaces par des aspérités (abrasion à deux corps) ou des particules « dures » (abrasion à trois corps), selon les quatre modes d'enlèvement de matière suivants :

- Couper.
- Repousser la matière en surface.
- Provoquer une fracture.
- Enlever des grains.

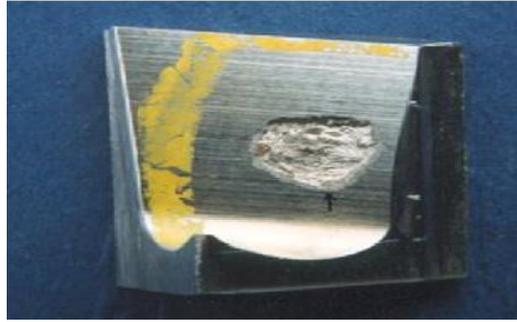
Le plus souvent les deux premiers cas se produisent plus que les deux derniers.



**Figure I.7.** Usure abrasive [19].

#### **I.4.4.3. L'usure par fatigue:**

C'est une dégradation par alternance d'échauffement et de refroidissements, qui touche des pièces comme les cylindres de laminoirs, les matrices de forge, mais aussi les surfaces rectifiées dans de mauvaises conditions.



**Figure I.8.** Usure par fatigue [19].

#### **I.4.4.4. L'usure de corrosion:**

L'endommagement domine par des réactions chimiques, et les produits de corrosion sont enlevés par action mécanique. Le processus de l'usure corrosive s'explique par les deux stades suivants :

- Dans le premier stade, il se produit la réaction de corrosion.  
Dans le second stade, le film du matériau corrodé enlevé lors du mouvement relatif des pièces en contact. Le matériau sous-adjacent est mis à nu et le processus recommence.



**Figure I.9.** Usure de corrosion [19].

#### **I.4.4.5. Usure par érosion:**

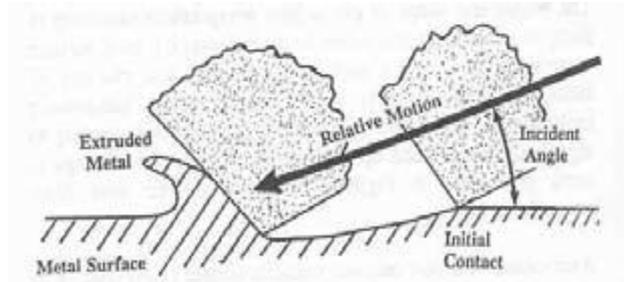
L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux.



**Figure I.10.** Usure d'Erosion [19].

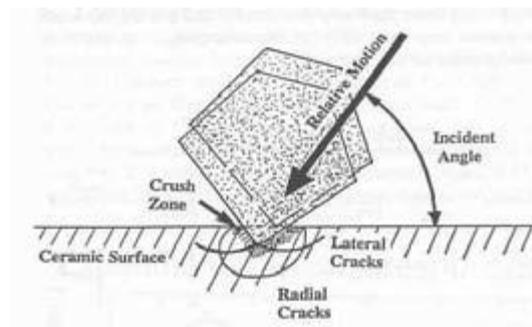
Deux comportements peuvent être observés:

Comportement ductile: Lorsque la particule impacte la surface, le matériau est extrudé et est éventuellement arraché par d'autres particules.



**Figure I.11.** Comportement ductile [20].

Comportement fragile: L'énergie des particules incidente est dissipée (en partie) par la création de nouvelles surfaces. Des fissures radiales et latérales sont formées.



**Figure I.12.** Comportement fragile [20].

#### I.4.5. Type secondaires d'usure:

- Cavitations,
- Corrosion de contact,
- Usure d'origine électrique.

#### I.5. Matériaux utilisés:

##### I.5.1. Acier:

L'acier est un alliage métallique ferreux, qui est d'ailleurs principalement composé de fer, l'élément additionnel étant le carbone, qui n'est présent qu'à l'état de traces infimes. Selon les aciers, la teneur en carbone est comprise entre environ 0.005% et 1.5% en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2% [21].

**I.5.2. Types des aciers :****➤ Aciers Non Alliés:**

Exemple de désignation: **C 40**

**C:** Symbole pour acier non allié

**40:** Pourcentage de la teneur moyenne en carbone multipliée par 100. Soit 0.40% de carbone.

Ces aciers conviennent pour traitement thermique et forgeage.

**➤ Aciers faiblement alliés:**

Exemple de désignation : **25 Cr Mo 4-25**

**25:** Pourcentage de la teneur moyenne en carbone multipliée par 100, soit 0.25 %.

**Cr Mo:** Un ou plusieurs groupes de lettres qui sont les symboles des éléments d'addition rangés dans l'ordre des teneurs décroissantes. Ici, Chrome (Cr) et Molybdène (Mo).

**4-25:** Une suite de nombre rangés dans le même ordre que les éléments d'alliages, et indiquant le % de la teneur moyenne de chaque élément. Les teneurs sont multipliées par un coefficient variable en fonction des éléments d'alliage.

**➤ Aciers fortement alliés**

Exemple de désignation: **X 5 Cr Ni 18-10**

**X:** Symbole acier fortement allié

**5 :** Pourcentage de la teneur moyenne en carbone multipliée par 100, soit 0.05 %

**Cr Ni:** Un ou plusieurs groupes de lettres qui sont les symboles des éléments d'addition rangés dans l'ordre des teneurs décroissantes. Ici, Chrome (Cr) et Nickel (Ni).

**18-10:** Une suite de nombre rangés dans le même ordre que les éléments d'alliages, et indiquant le % réel de la teneur moyenne de chaque élément. Ici, 18 % de Chrome et 10 % de Nickel.

**I.5.3. Le cuivre:**

Le cuivre est un métal dont la structure est cubique à faces centrées (CFC) à toute température inférieure à sa température de fusion (1 084 °C).

Il est particulièrement apprécié pour certaines de ses caractéristiques :

- sa faible résistivité électrique;  $0,017 \mu\Omega \cdot m$  à 20 °C;
- sa bonne conductivité thermique;  $400 W / (m \cdot K)$ ;
- sa bonne résistance à certaines corrosions. Son potentiel normal d'oxydoréduction à 25 °C [+ 0,34 V (Cu-Cu<sup>2+</sup>)] en fait le métal usuel le plus noble; au contact des eaux il se recouvre d'une couche (oxydes, carbonates...) qui le protège [22].

# **Chapitre II:**

## **Présentation de la partie expérimentale et modélisation numérique**

### **II.1.Introduction**

Dans ce chapitre, on a présenté les deux méthodes utilisées pour étudier l'influence des caractéristiques thermique et mécanique du pion en cuivre en contact dynamique avec un disque en acier sur l'usure dans des conditions données : Charge appliquée et vitesse de glissement.

Expérimentalement, on a utilisé des résultats trouvés précédemment [6] pour le coefficient de frottement et la perte de masse en fonction de la charge appliquée et la vitesse de glissement d'un tribomètre pion-disque installé au laboratoire de mécanique de l'université de Constantine.

Numériquement, un code calcul COMSOL MULTIPHYSICS a été utilisé pour la détermination de la répartition de flux généré par frottement entre le pion et le disque ainsi que la température.

Ce travail a permis aussi de déterminer l'effet des conditions environnementales sur la perte de masse.

### **II.2. Montage expérimentale:**

#### **II.2.1.Présentation du tribomètre pion-disque:**

La machine est un tribomètre pion-disque. Il comprend essentiellement : un bâti, disque, pion et un moteur électrique (Figure II.1). Les essais ont été effectués (à l'air ambiant) à des vitesses de glissement de : 0,1 à 0,5 m/s, sous des charges de : 5 à 20 N. Le test consiste à appliqué une charge normale sur le pion fixe en contact avec le disque qui, lui même est fixé par une vis animée d'un mouvement de rotation. La force tangentielle de frottement  $F_t$  est mesurée par un capteur de force.

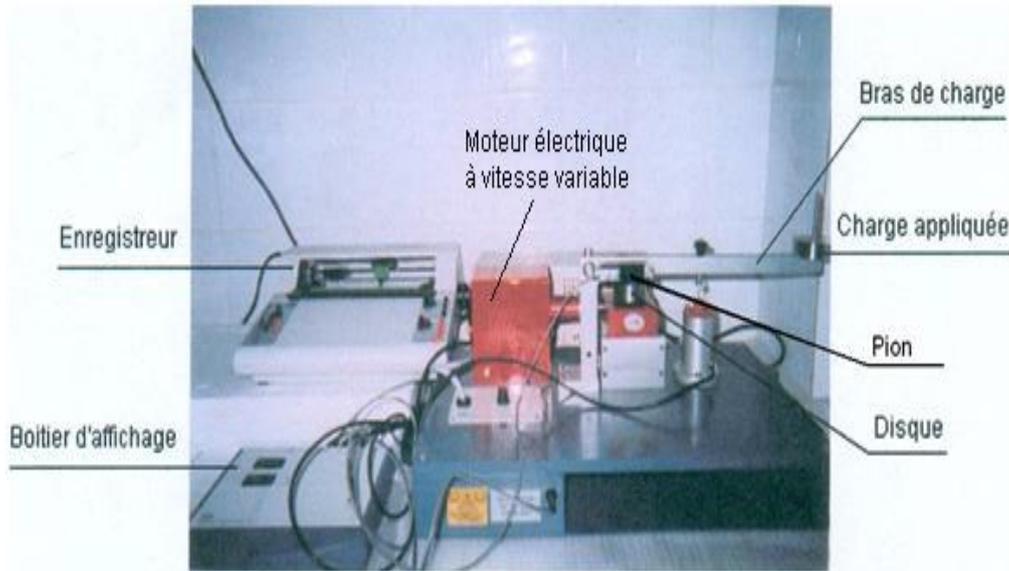


Figure II.1. Vue d'ensemble du tribomètre

### II.3. Dimensions et géométries des éléments du couple tribologique

#### II.3.1. Disque

Le disque est un plateau de forme cylindrique, de diamètre 50 mm et d'une épaisseur de 12 mm, il possède un trou lamé au centre, ce dernier permet la fixation du disque à l'aide d'une vis sur le support du tribomètre (Figure II.2).

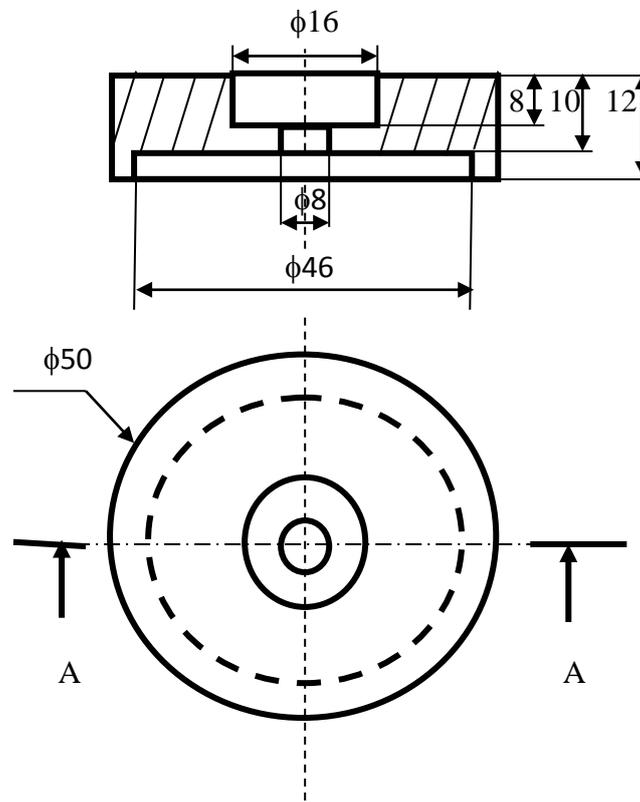
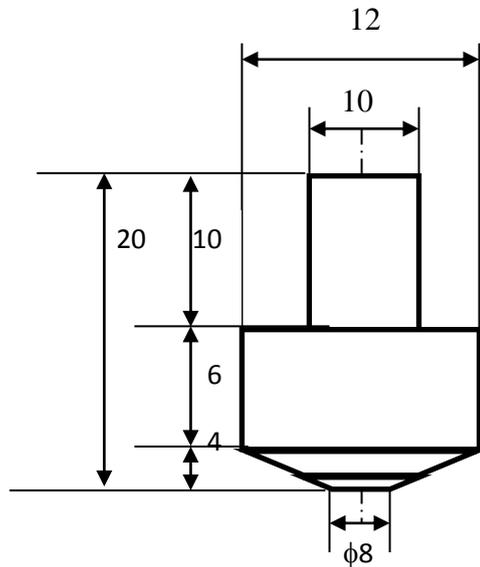


Figure II.2. Dessin de définition du disque

### **II.3.2. Pion**

Il s'agit d'une tige de longueur de 20 mm et de diamètre égale à 8 mm, le pion est fixé dans un trou à l'aide d'une vis de blocage, sur un bras de charge en aluminium, comme l'indique les figures II.3.



**Figure II.3.** Dessin de définition du pion

## **II.4. Moyens de mesure**

### **II.4.1. Mesure du coefficient de frottement**

La charge normale appliquée au pion étant connue. Le coefficient de frottement est égal au ratio effort tangentiel mesuré sur effort normal appliqué :

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (\text{II.1})$$

### **II.4.2. Mesure de l'usure du pion**

L'usure du pion en cuivre est évaluée par la mesure de la perte en masse avant et après chaque essai à l'aide d'une microbalance sensible de précision 10<sup>-5</sup> g. La différence entre les deux pesées donne directement l'usure W qu'on a exprimée en milligramme :

$$W = \Delta m = m_i - m_f \quad [\text{mg}] \quad (\text{II.2})$$

$m_i$  : Masse initiale du pion

$m_f$  : Masse finale du pion



**Figure II.4.** Microbalance de précision  $10^{-5}$  g

### **II.4.3. Mesure de la température**

La température est mesurée grâce à un thermomètre infrarouge sans contact.



**Figure II.5.** Thermomètre infrarouge

## **II.5. Caractéristiques des matériaux**

### **II.5.1. Matériaux du pion Cuivre (Cu)**

#### **II.5.1.1. Compositions chimiques**

	C%	Cr%	Ni%	Cu%
Cu	-	-	-	99,99

**Tableau II.1.** Compositions chimiques de cuivre [23]

#### **II.5.1.2. Caractéristiques mécaniques**

	Rp [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A%	M.de Young [Gpa]	M.de Coulomb [Gpa]
Cu	120	200	25-35	118	44

**Tableau II.2.** Caractéristiques mécaniques de cuivre [23]

#### **II.5.1.3. Propriétés physiques**

	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>p</sub> [J/Kg <sup>o</sup> c]	$\lambda$ [W/m. <sup>o</sup> c]
Cu	8,92.10 <sup>3</sup>	386	394

**Tableau II.3.** Propriétés physiques de cuivre [23]

### **II.5.2. Matériau du disque acier C45(XC48)**

#### **II.5.2.1. Compositions chimiques :**

Le tableau ci-dessous donne les compositions chimiques en pourcentage des matériaux utilisés selon la norme EN 10277-2 pour l'acier C45

	Fe%	Ni%	Mn%	C%	Si%	Cr%	Mo%	P %	S%
C45(XC48)	97,31	0,40	0,80	0,50	0,40	0,40	0,10	0,045	0,045

**Tableau II.4.** Compositions chimiques de l'acier C45 [24]

### II.5.2.2. Caractéristiques mécaniques

	HB	Limite élastique $R_p$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Résistance à la rupture $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	A%
C45(XC48)	190	430	650-800	16

**Tableau II.5.** Caractéristiques mécaniques de l'acier C45 [24]

### II.5.2.3. Propriétés physiques

	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/Kg <sup>o</sup> c]	$\lambda$ [W/m. <sup>o</sup> c]
C45(XC48)	$7,85 \cdot 10^3$	480	44,9

**Tableau II.6.** Propriétés physiques de l'acier C45 [25]

## II.6. Modélisations numérique

### II.6.1. Introduction

De nos jours, l'ordinateur et les logiciels développés jouent un rôle essentiel dans la science et l'ingénierie. Un large éventail d'options de simulation est disponible, et l'analyse des composants numériques est importante lors du développement de nouveaux produits ou de l'amélioration de conception. Ces programmes reposent sur des langages de programmation qui utilisent des méthodes mathématiques avancées. Dans ce travail, nous avons utilisé le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS qui est basé sur la méthode des éléments finis pour coupler et simuler notre phénomène physique.

L'objectif de l'utilisation de la simulation numérique est l'estimation de la température de contact du pion.

### II.6.2. Hypothèses

Pour résoudre notre problème numériquement, il est donc nécessaire de considérer quelques hypothèses, qui seront d'une grande utilité pour simplifier les calculs. Pour ce faire, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- le contact entre la surface du pion et celle du disque est considéré parfait;
- les calculs numériques sont effectués sans tenir compte de l'usure;
- le rayonnement est négligé;
- les matériaux du pion et du disque sont isotropes et non déformable;
- le coefficient de convection est supposé constant :  $h_{\text{air}}=10\text{W/m}^2\text{k}$  ;
- la charge est appliquée en un point au centre de la surface supérieur du pion;
- la pression est répartie uniformément sur la surface de contact du pion et du disque;
- le coefficient de frottement est variable ;

### II.6.3. Equations physiques et conditions aux limites [26]:

Afin d'étudier le frottement, on doit résoudre l'équation de la chaleur en coordonnées cartésiennes qui gouverne les transferts de chaleur dans les deux corps :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T \right) = \lambda \nabla^2 T \quad (\text{II.3})$$

#### En régime transitoire :

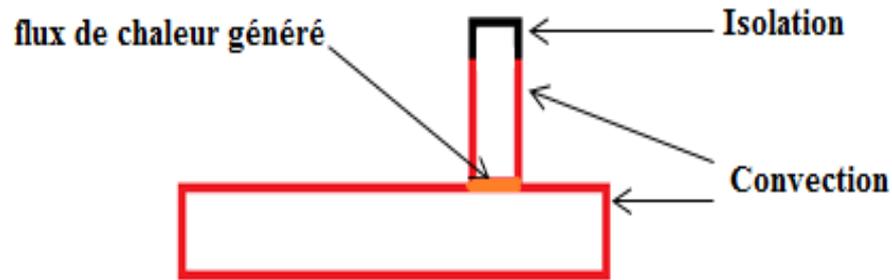
Pour le disque :

$$\lambda_d \Delta T_d = \rho_d C_{pd} \left( \frac{\partial T_d}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \vec{\nabla} T_d \right) \quad (\text{II.4})$$

Pour le pion:

$$\lambda_p \Delta T_p = \rho_p C_{pp} \left( \frac{\partial T_p}{\partial t} \right) \quad (\text{II.5})$$

Les conditions aux limites sont montrées sur la figure suivante :



**Figure II.6.** Conditions aux limites imposées.

#### **II.6.4. Détermination de flux de chaleur total généré par frottement**

La puissance dissipée correspond au travail de la force tangentielle  $F_T$  et s'exprime par la relation suivante :

$$\Phi = F_T \cdot V \quad (\text{II.6})$$

$\Phi$  est le flux de chaleur (Watt),  $V$  est la vitesse de glissement (m/s)

La densité de flux dissipée est alors égale à :

$$q_t = \frac{\Phi}{A} = \frac{F_T \cdot V}{A} = \frac{\mu \cdot F_N \cdot V}{A}$$

Dans le cas où le coefficient de frottement dépend du temps, l'expression de la densité de flux dissipé devient : (II.7)

$$q_t(t) = \frac{F_N \cdot V}{A} \mu(t) \quad (\text{II.8})$$

### II.6.5. Détermination du coefficient de partage du contact pion-disque :

Les résultats obtenus sont utilisés pour calculer les paramètres thermiques, elle est donnée par les formules suivantes :

Les expressions de la densité des flux  $q_d$ ,  $q_p$  et  $q_t$  sont :

$$q_t = q_d + q_p$$

$$q_p = \lambda_p \frac{\Delta T}{dz}$$

Où  $\Delta T$  est la différence entre la température des deux points choisis sur le pion et  $dz$  est la distance entre la position des deux points. Cette distance est égale à 0.25mm.

Le coefficient de partage :

Pour le pion :

$$\gamma_p = \frac{q_p}{q_t}$$

Et pour le disque:

$$\gamma_d = 1 - \gamma_p$$

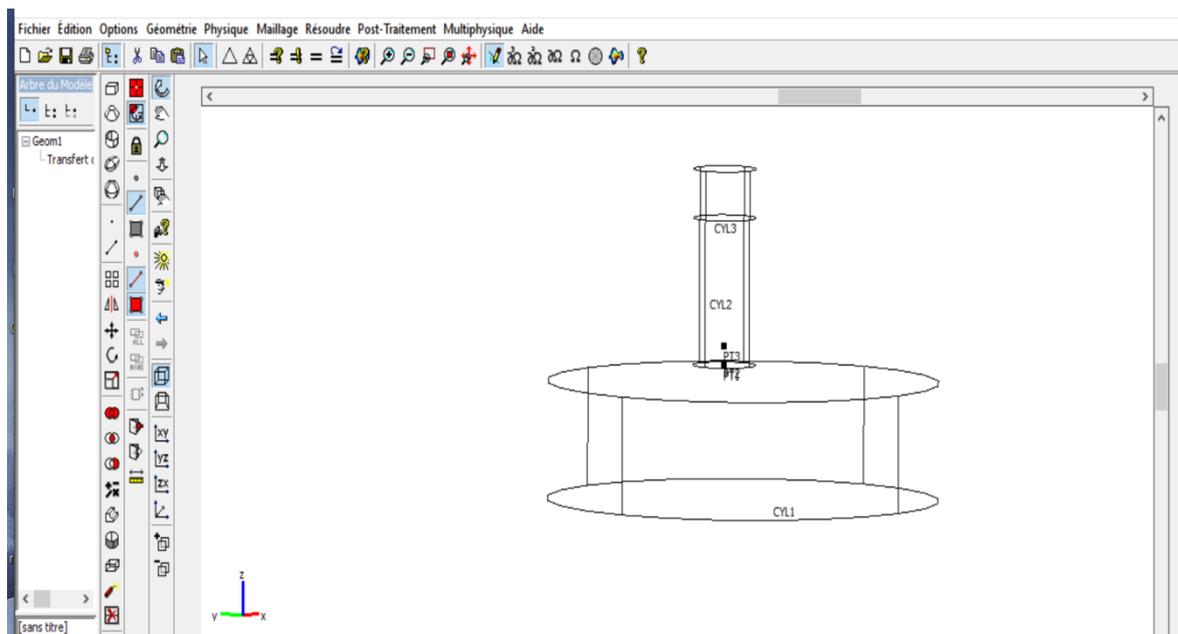


Figure II.7. Position des deux points choisis sur le pion

### II.6.6. Résolution sur COMSOL

L'utilisateur définit premièrement ses dimensions avec son mode physique. Les différentes étapes de processus de modélisation à suivre, par la suite, sont :

- Définition de la géométrie.
- Ecriture des propriétés des matériaux dans le tableau des constantes.
- Introduction des caractéristiques des matériaux et des conditions aux limites.
- Maillage de la géométrie.
- Choix du solveur.
- Résolution du problème et affichage les résultats.

### II.6.7. La géométrie utilisée

La géométrie utilisée dans notre problème est présentée en 3D dans la figure II.8. Les dimensions du pion et du disque sont les mêmes utilisées dans nos expériences. La détermination de la température du pion est effectuée selon un point choisi à une distance de 0.25mm de l'interface de contact.

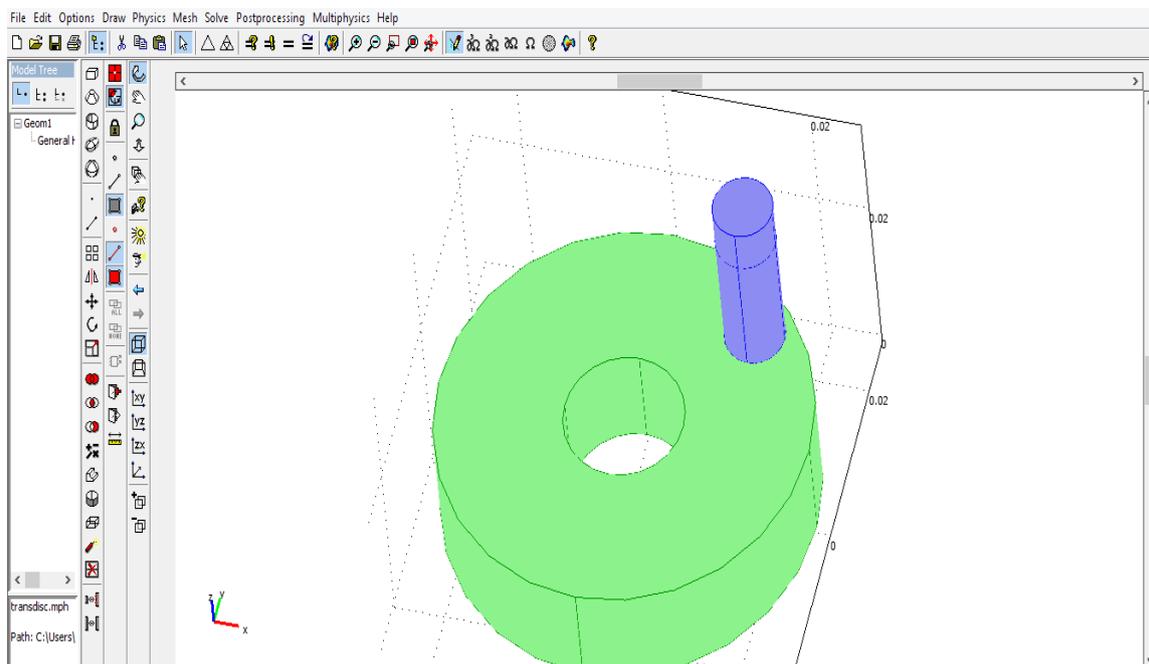
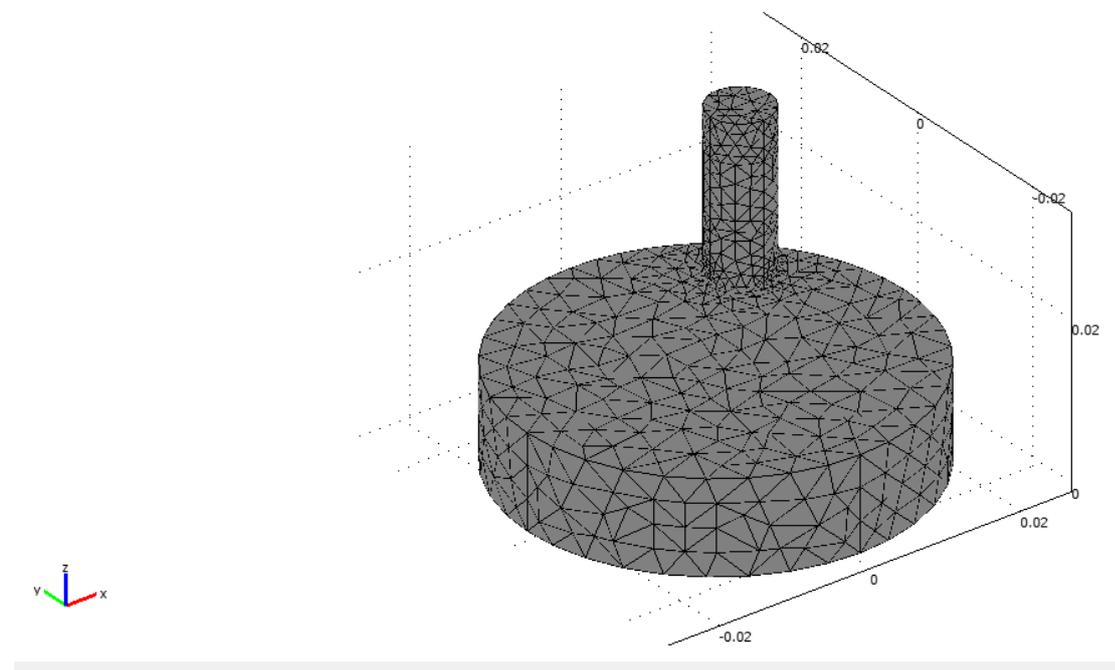


Figure II.8. Géométrie du contact pion-disque en 3D

**II.6.8. Le maillage:**

Pour mailler notre modèle géométrique, on a utilisé des éléments triangulaires. Un maillage fin au niveau du contact et progressif vers le milieu a été choisi afin de limiter le temps de calcul et avoir des résultats plus précis et en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement. Le nombre des éléments utilisés est 7601 éléments (figure II.9). Ce nombre des éléments a été obtenu en testant plusieurs maillages pour avoir un résultat indépendant et stable.



**Figure II.9.** Maillage du contact pion-disque.

Le tableau suivant montre l'effet du choix de maillage sur la stabilité des résultats obtenus :

<b>Nombre des éléments utilisés</b>	<b>Température(k)</b>
3871	334.809
7601	334.826
10081	334.826
12032	334.826

**Tableau II.7.** Choix du maillage

# **Chapitre III:**

## **Résultats et discussion**

### III.1.Introduction

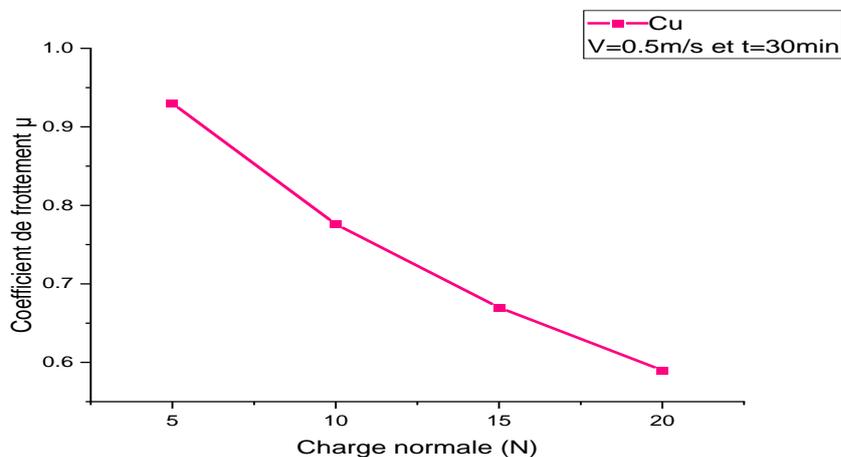
Dans ce chapitre, on présente les résultats trouvés de l'évolution de la température, le coefficient de frottement, l'usure (perte de masse) et la densité de flux échangé en fonction de la vitesse de glissement (0.1~0.5 m/s) et de la charge normale appliquée sur le pion (5~20 N) dans les deux régimes : stationnaire et transitoire. Les résultats expérimentaux obtenus de la température du pion en cuivre qui est en contact avec un disque en acier sont comparés avec les températures obtenus par le code de calcul Comsol.

### III.2.Résultats expérimentaux

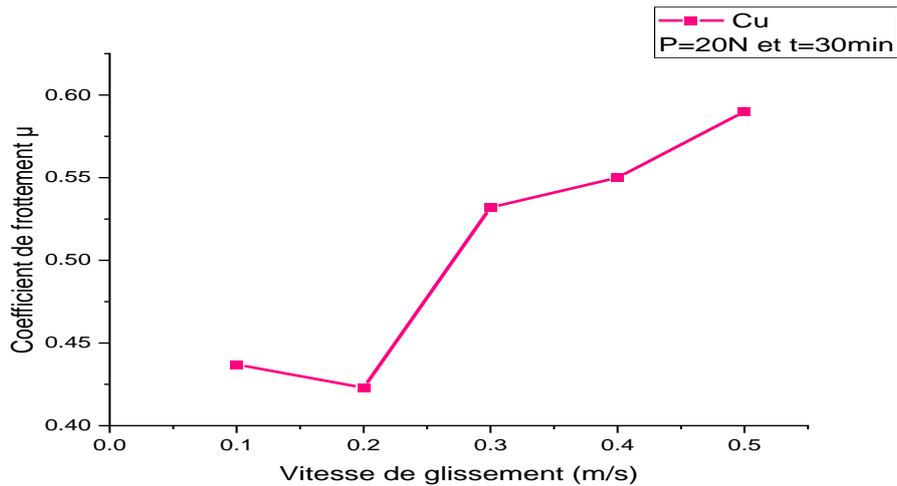
#### III.2.1. Influence de la charge normale et de la vitesse de glissement:

##### ➤ Sur le coefficient de frottement

Les figures III.1 et III.2 représentent la variation de coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée et la vitesse de glissement. En remarquant la figure III.1, on trouve que le coefficient de frottement diminue en augmentant la charge appliquée. L'augmentation de la charge conduit à une réduction du coefficient de frottement. L'observation de la figure III.2 montre que le coefficient de frottement augmente avec l'augmentation de la vitesse de glissement.



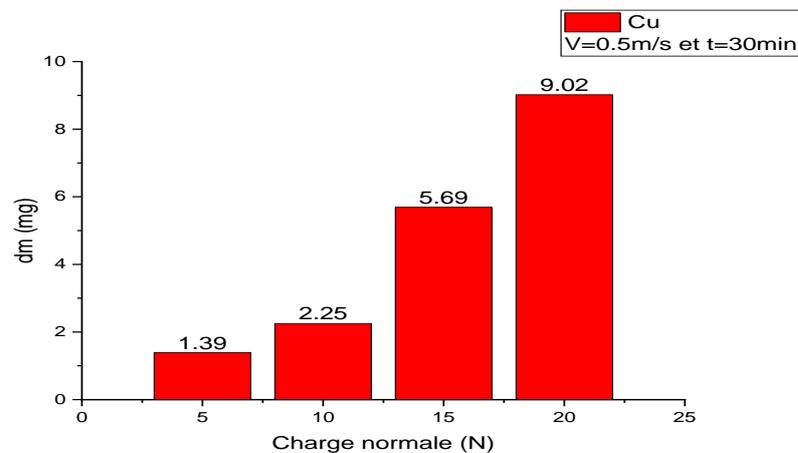
**Figure.III.1.** Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale.



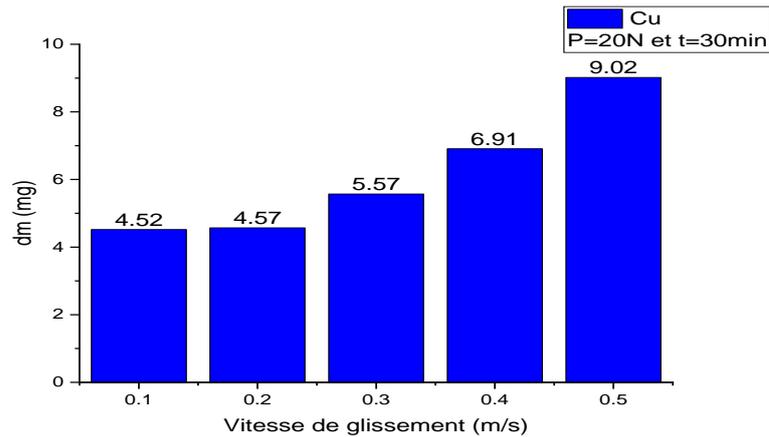
**Figure.III.2.** Variation du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement.

➤ **Sur l'usure (perte de masse)**

Les figures III.3 et III.4 représentent la variation de la perte de masse du pion en fonction de la charge appliquée et la vitesse de glissement. Elles montrent que la perte de masse du pion en cuivre augmente avec la vitesse de glissement et la charge appliquée. La vitesse montre une influence plus importante que la charge sur la perte de masse.



**Figure III.3:** Variation de la perte de masse en fonction de la charge normale.

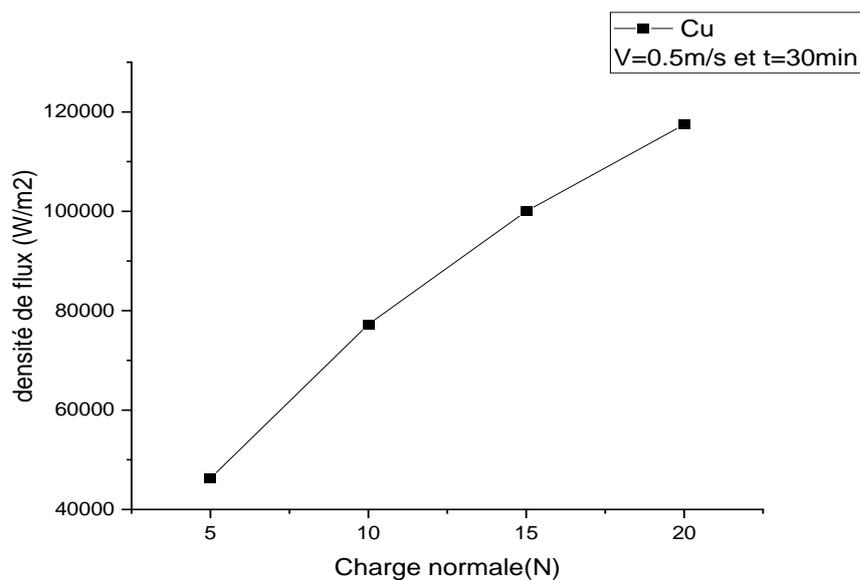


**Figure III.4:** Variation de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.

➤ **Sur la densité de flux:**

La figure III.5 représente la variation de la densité de flux en fonction de la charge appliquée. On observe une courbe croissante presque linéaire, il y a une relation proportionnelle entre la densité de flux et la charge normale.

La figure.III.6 représente l'évolution de la densité de flux en fonction de la vitesse de glissement. On remarque une augmentation presque linéaire de la densité de flux entre les deux vitesses 0.1m/s et 0.5m/s. En comparant les résultats des deux courbes, on trouve que l'effet de la charge sur l'augmentation de la densité de flux est plus important que la vitesse de glissement.



**Figure.III.5:** Variation de densité de flux en fonction de la charge normale.

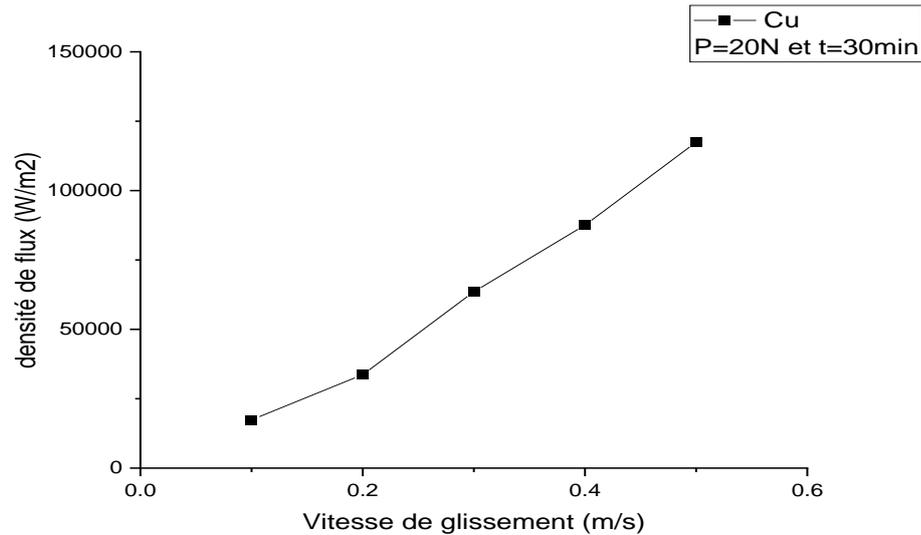


Figure.III.6: Variation de la densité de flux en fonction de la vitesse de glissement.

### III.2.2. Influence des conditions ambiantes sur la perte de masse

#### ➤ Température ambiante

La figure III.7 regroupe les graphes de l'usure et de la température ambiante en fonction de la charge normale et la vitesse de glissement. On observe que les courbes des deux figures présentent le même sens de variation, une augmentation avec la vitesse et la charge. La perte de masse varie proportionnellement avec la température ambiante.

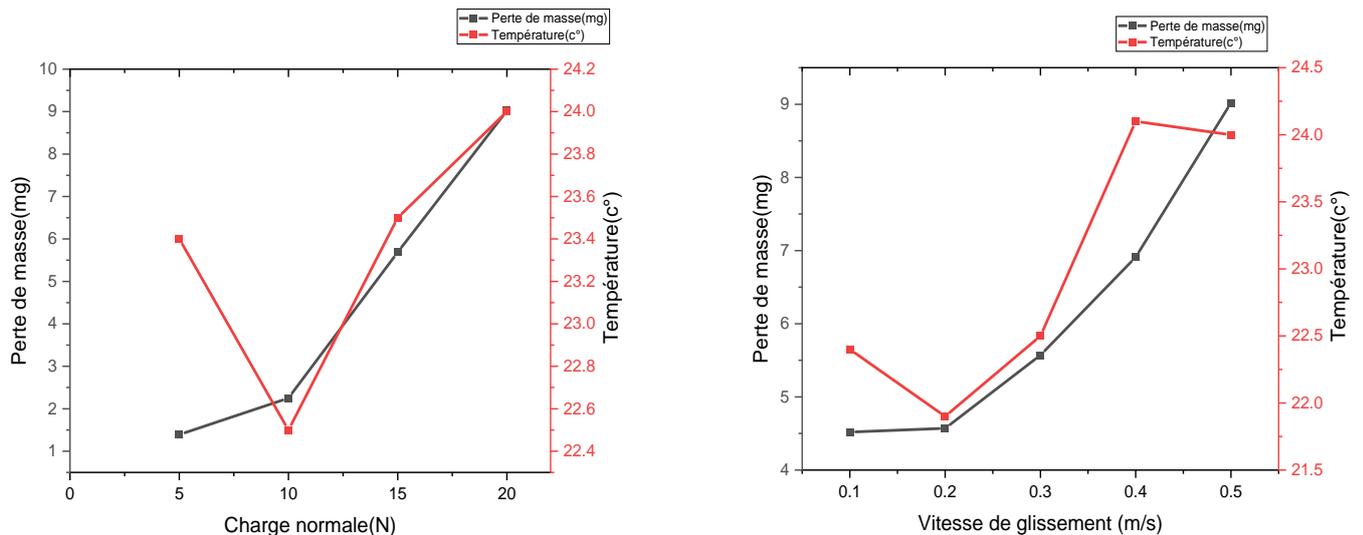
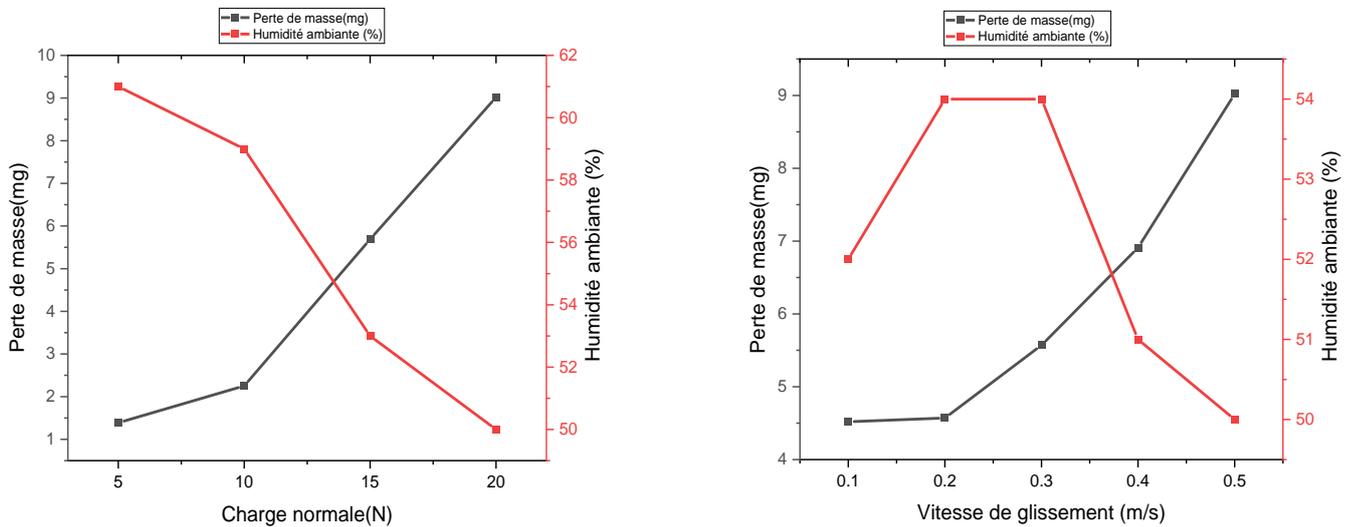


Figure.III.7. Variation de la perte de masse et de la température ambiante en fonction de la charge normale ( $V=0,5$  m/s) et la vitesse de glissement ( $P=20$  N).

➤ **Humidité ambiante**

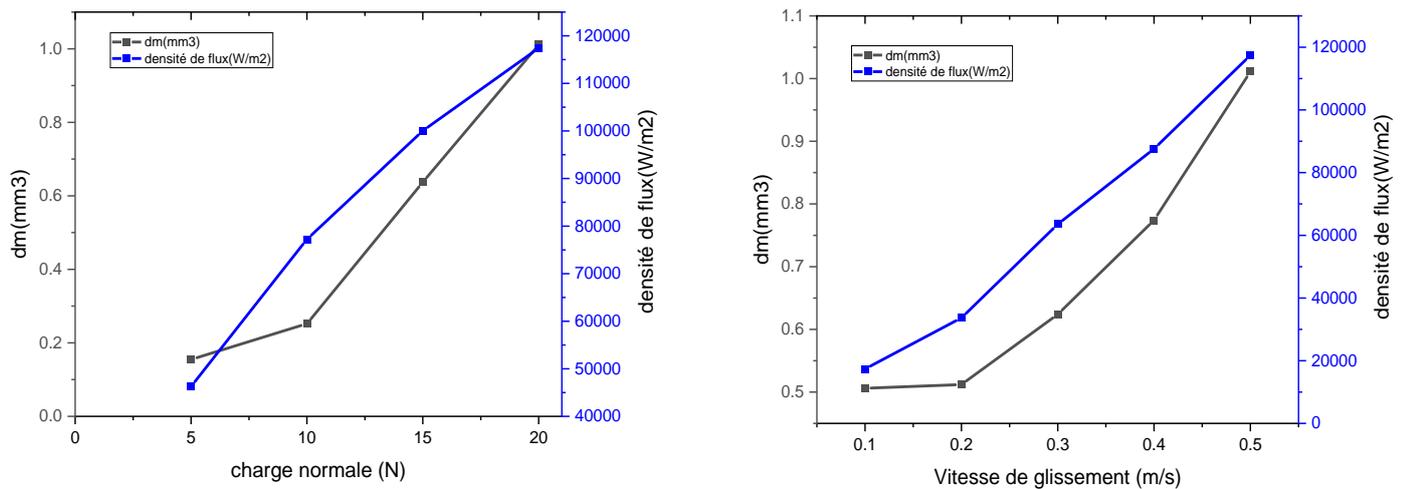
La figure III.8 représente la variation de la perte de masse et de l'humidité ambiante en fonction de la charge et la vitesse. On observe une augmentation des pertes de masse en diminuant l'humidité ambiante. Ce résultat explique l'effet de l'humidité sur l'usure du pion.



**Figure.III.8.** Variation de l'humidité ambiante charge normale ( $V=0,5$  m/s) et la vitesse de glissement ( $P=20$  N).

**III.2.3. Variation de la perte de masse en fonction du flux échangé pour différentes charge et vitesse:**

Les graphes de la figure III.9 représentent la variation de la perte de masse et de la densité de flux en fonction de la charge normale et la vitesse de glissement. On remarque que la perte de masse augmente avec la densité de flux. Cela est dû à l'échauffement au niveau de contact qui ramène à un adoucissement du matériau et qui conduit par la suite à l'usure.



**Figure.III.9.** Variation de la perte de masse et la densité de flux en fonction de la charge normale ( $V=0,5$  m/s) et la vitesse de glissement ( $P=20$  N).

### III.3. Partie numérique :

#### III.3.1.Régime stationnaire:

##### III.3.1.1.Température de surface:

	X (m)	Tmax (K)
V=0.5m/s et P=20N	0.0113	394.388
V=0.5m/s et P=5N	0.0113	334.868
V=0.1m/s et P=20N	0.0112	310.071

**Tableau III.1:** Position de la température de surface maximale.

L'examen des résultats du tableau III.1 montre que la position de la température de surface maximale dite 'température flash' dépend de la vitesse de glissement.

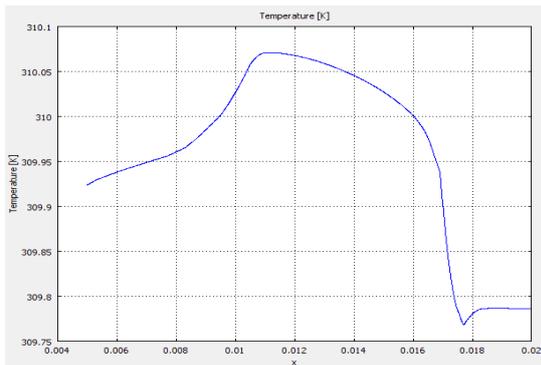
En vue d'étudier la variation de la température de surface du contact pion-disque, nous avons effectué des calculs qui nous ont permis de tracer des courbes identifiants cette température à l'interface. Cette identification est réalisée en phase stationnaire.

Les courbes de la figure III.10 (a, b et c) montrent une nette élévation de la température en augmentant la vitesse ou la charge.

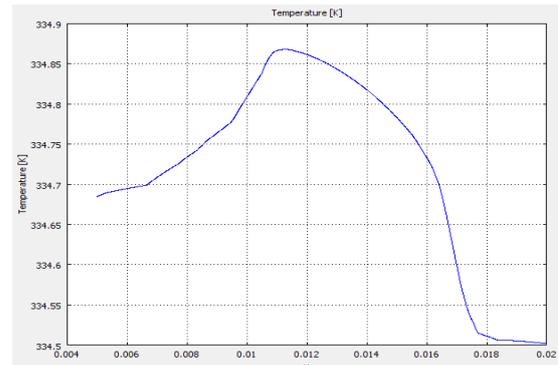
Pour une vitesse  $V=0.1$  m/s et une charge  $P=20$ N, nous observons sur la figure.III.10.a que la température de surface maximale atteint 310.071K.

Pour une vitesse  $V=0.5$  m/s et une charge de  $P=5$ N, la figure III.10.b montre que la température maximale devient 334.868K.

Même observation, pour la même vitesse  $V=0.5$ m/s et la charge  $P=20$ N, la température de surface maximale croit de 334.868K à 394.388K (figure III.10.c).



(a)



(b)



(c)

**Figure.III.10** : Evolution de la température de surface d'un contact Cuivre-Acier.

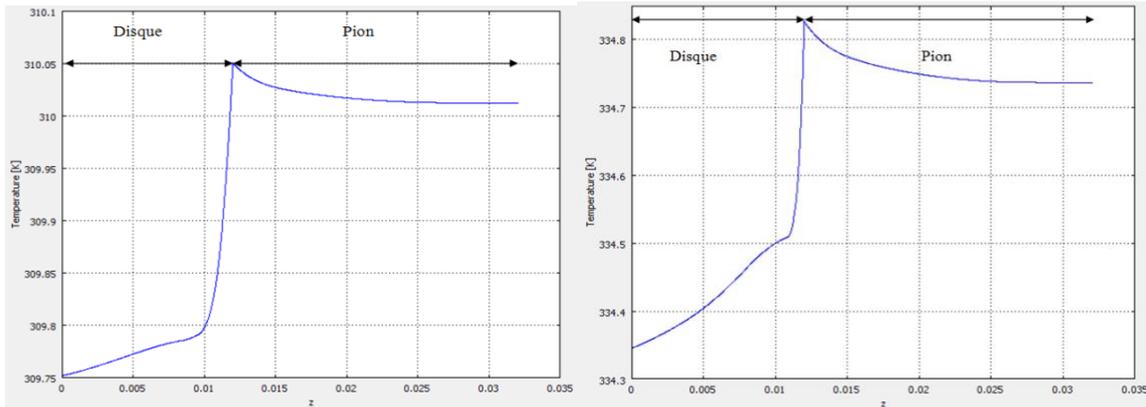
### III.3.1.2. Variation de la température suivant la profondeur:

Dans le but de suivre l'évolution de la température au sein des deux solides, nous avons représenté dans la figure.III.11, sa variation suivant la profondeur du pion et du disque. En examinant les courbes de cette figure, nous remarquons la succession des phénomènes suivants :

Pour une vitesse de 0,1m/s et une charge de 20N, la figure III.10 a montre une nette augmentation de la température. La température maximale se situe à l'interface. Il est important de noter que le profil de température pour le pion est plus élevé que celui du disque.

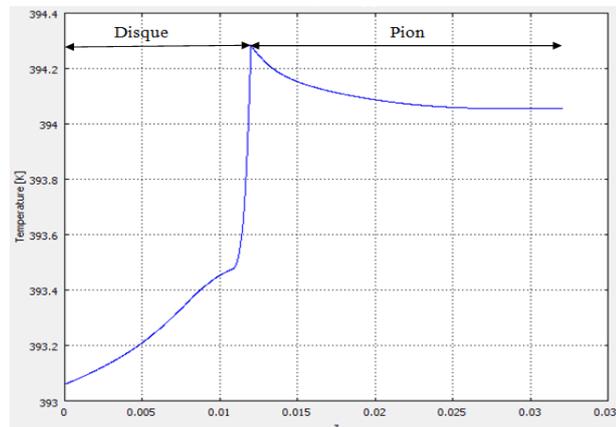
Cela revient au volume des deux corps, aux propriétés thermiques du pion qui est en Cuivre et au contact permanent du pion sur le disque.

En changeant la charge à 5 N et en augmentant la vitesse de déplacement ( $V=0.5\text{m/s}$ ), la figure III.11.b montre que la température des deux corps augmente. Observation identique en gardant la même vitesse et en augmentant la charge à 20 N (figure III.11.c), la température des deux corps continu à augmenter.



(a)

(b)

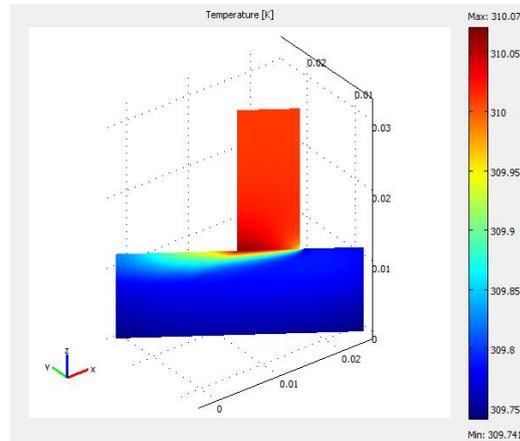


(c)

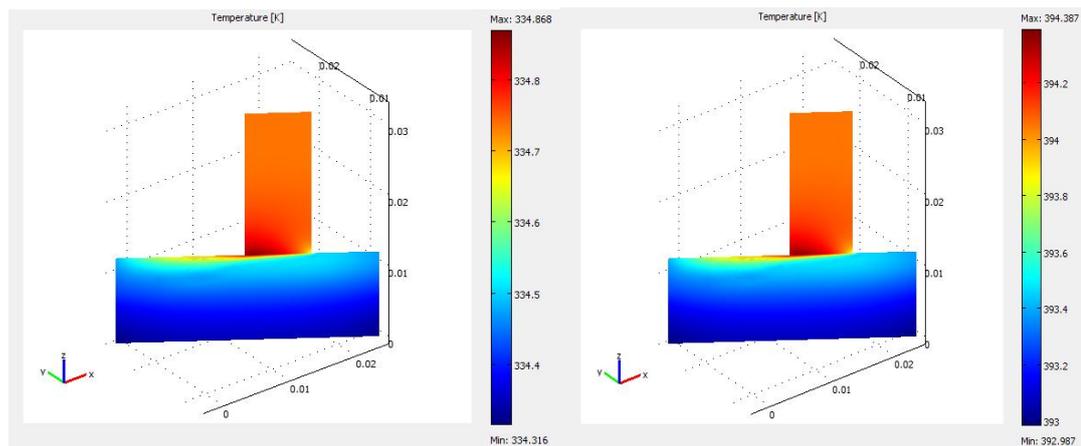
**Figure.III.11 :** Evolution de la température suivant la profondeur du contact pion-disque.

La figure III.12 représente des cartographies thermiques pour différentes valeurs de vitesse de déplacement et charge appliquée. Elles permettent de mettre en évidence le développement de la pénétration de la chaleur générée à l'interface de contact pion-disque. On observe sur cette figure que la pénétration de la chaleur à l'intérieur du disque est plus importante quand la vitesse de déplacement est petite (figure III.12.a). En augmentant la vitesse (figure III.12.b et III.12.c), les zones affectées par la température deviennent moins significatives. L'épaisseur de pénétration varie inversement avec la vitesse de la source. Ce résultat est dû au temps de

contact entre le pion et le disque qui diminue avec l'augmentation de la vitesse de déplacement de la source de chaleur.



(a) :  $V=0.1\text{m/s}$  et  $P=20\text{N}$



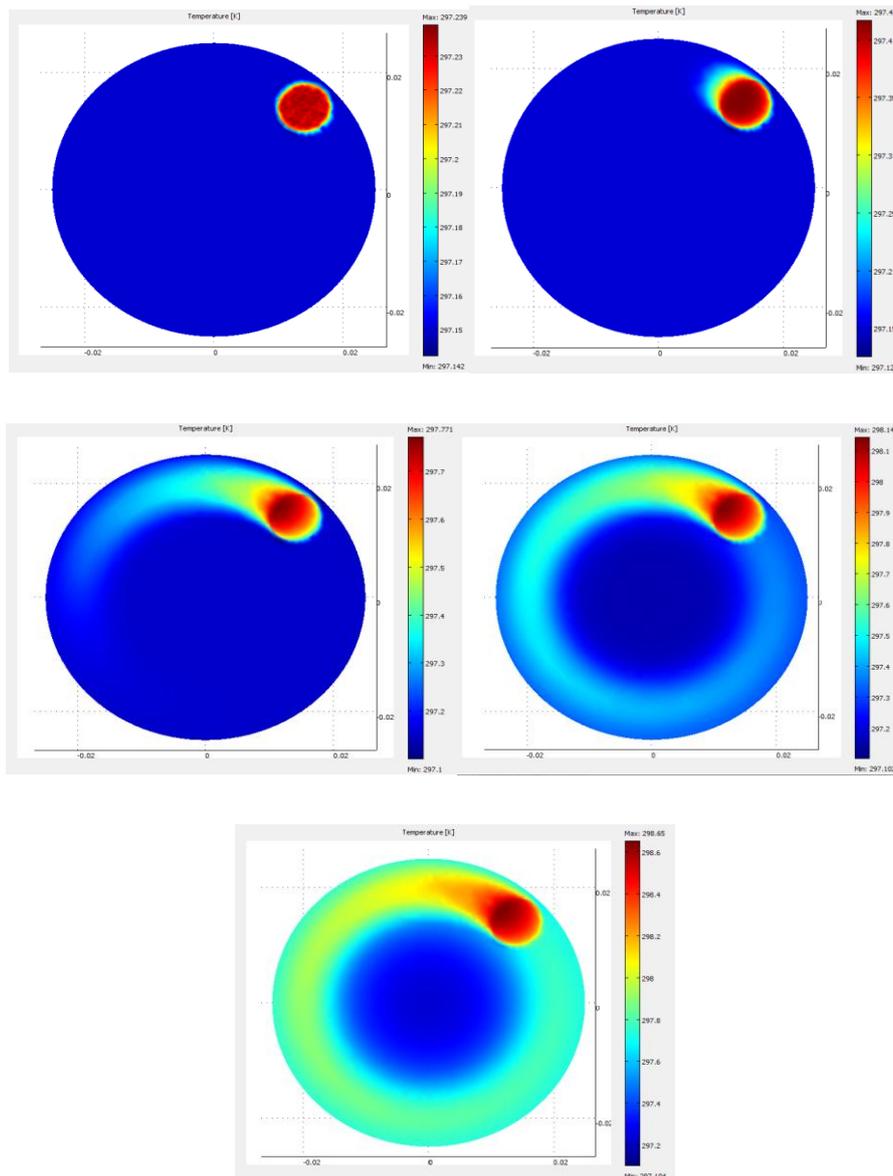
(b) :  $V=0.5\text{m/s}$  et  $P=5\text{N}$

(c) :  $V=0.5\text{m/s}$  et  $P=20\text{N}$

**Figure.III.12:** Cartographies de la température suivant la profondeur du contact pion disque.

### III.3.2. Régime transitoire

Nous avons établi à l'aide du modèle numérique, des cartographies thermiques du contact pion-disque pour une vitesse de glissement égale à  $0.5\text{m/s}$  et une charge de  $20\text{N}$  pendant les instants :  $0.001\text{s}$ ,  $0.01\text{s}$ ,  $0.1\text{s}$ ,  $1\text{s}$  et  $5\text{s}$ . Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure.III.13. Ils montrent d'une part la création du champ thermique de la chaleur au niveau de la zone de contact au début de déplacement du pion. D'autre part, le champ de température qui se développe progressivement avec le temps en suivant la direction du déplacement pour des instants plus importants.

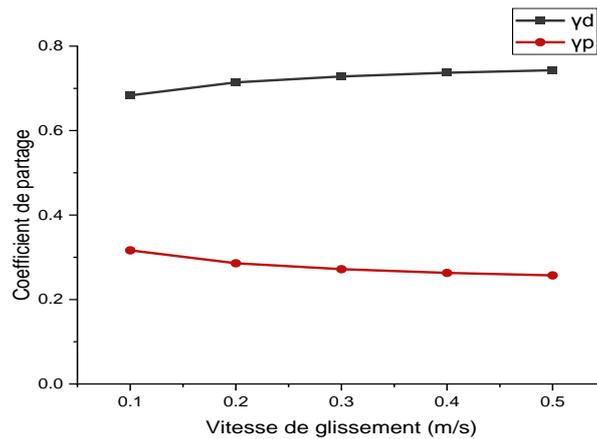


**Figure III.13:** Cartographies des températures de surface du disque,  $V = 0,5\text{m/s}$  et  $P = 20\text{N}$ ,  $t = (0.001\text{s}, 0.01\text{s}, 0.1\text{s}, 1\text{s} \text{ et } 5\text{s})$ .

### III.4. Evolution du coefficient de partage en fonction de la charge et de la vitesse de glissement

#### ➤ en fonction de la vitesse de glissement

La figure III.14 représente la variation du coefficient de partage coté pion et disque en fonction de la vitesse de glissement. Pour la courbe du coefficient de partage coté pion, on remarque qu'il diminue en augmentant la vitesse de glissement. Le coefficient de partage coté disque varie inversement.



**Figure.III.14.** Variation du coefficient de partage côté pion et côté disque en fonction de vitesse de glissement (m/s).

➤ **en fonction de la charge**

On remarque que les valeurs de coefficient de partage coté disque et pion (tableau III.2) sont constante en fonction de la charge appliquée. La charge appliquée n'a aucun effet sur le coefficient de partage.

	<b>P= 5N</b>	<b>P= 10N</b>	<b>P= 15N</b>	<b>P= 20N</b>
$q_t$	46277.866	77229.299	100019.904	117436.3057
$q_p$	11900.8	19862.4	25724.8	30203.2
$\gamma_p$	0.2571	0.2571	0.2571	0.2571
$\gamma_d$	0.7429	0.7429	0.7429	0.7429

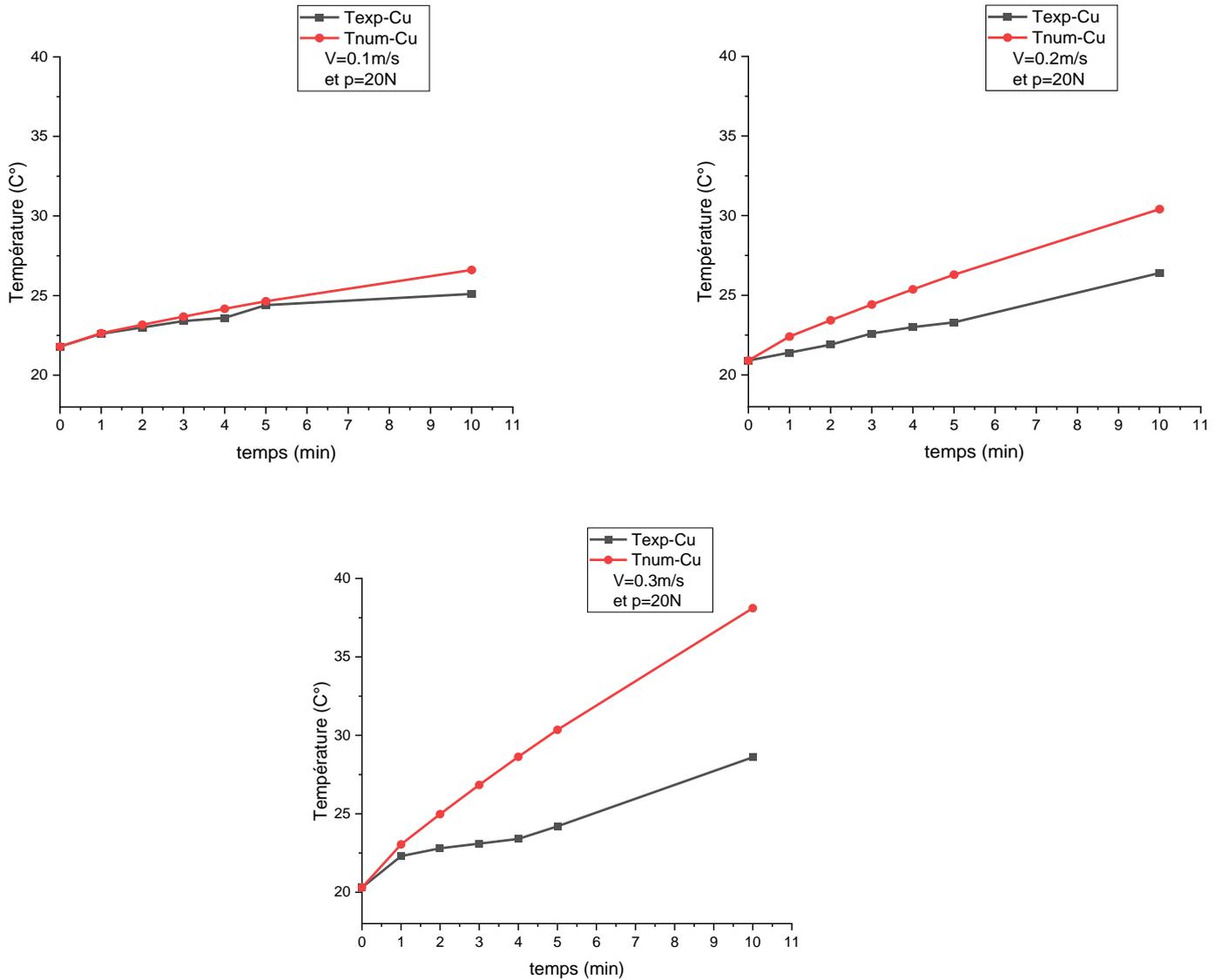
**Tableau III.2:** Valeurs du coefficient de partage du contact pion-disque en fonction des différentes charges ( $V=0.5\text{m/s}$ ).

### III.5. Comparaison

La figure.III.15 représente la variation de la température numérique et expérimentale du pion en fonction du temps pour une charge  $P=20\text{N}$  et différente vitesse de glissement. On remarque sur ces courbes que les valeurs numériques sont plus importantes. L'écart entre les deux résultats augmente en fonction du temps.

Cela est certainement dû aux:

- Erreurs de mesures expérimentales.
- Hypothèses proposées pour la modélisation numérique.



**Figure III.15:** Variation de la température numérique et expérimentale en fonction du temps (P=20 N, V=0,1m/s, 0,2 m/s et 0,3 m/s).

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté un aperçu général sur la tribologie ainsi que une étude sur les paramètres thermiques et mécaniques d'un contact dynamique pion-disque. Ce travail a été réalisé dans le but de la détermination du coefficient de partage, du coefficient de frottement, de la perte de masse et de la température d'un pion en cuivre en contact avec un disque en acier en fonction de la vitesse de glissement (0.1~0.5 m/s) et de la charge normale (5 ~20 N) en deux régimes stationnaire et transitoire. Pour ce faire, nous avons utilisé deux méthodes, expérimentale par un tribomètre pion-disque et numérique en utilisant le code de calcul COMSOL MULTIPHYSICS.

Les observations les plus importantes des résultats obtenus peuvent être résumées comme suit:

- Le coefficient de frottement varie inversement avec la charge normale.
- L'augmentation de la vitesse de glissement conduit à un coefficient de frottement plus élevé.
- La vitesse a un effet plus important que la charge sur la perte de masse.
- L'effet de la charge sur l'augmentation de la densité de flux est plus important que la vitesse de glissement.
- La perte de masse varie proportionnellement avec la température ambiante.
- L'humidité ambiante a un effet significatif sur l'usure du pion.
- La perte de masse augmente avec la densité de flux généré par frottement.
- L'augmentation de la charge ou la vitesse entraîne une augmentation de la température du pion.
- La pénétration de la chaleur à l'intérieur du disque est plus importante quand la vitesse de déplacement est petite.
- Le coefficient de partage côté pion décroît avec l'augmentation de la vitesse de glissement.
- La charge appliquée n'a aucun effet sur le coefficient de partage.
- La comparaison effectuée entre la température du pion numérique et expérimentale à montrer qu'il y a une différence entre les deux résultats qui est probablement dû aux :
  - Erreurs de mesures expérimentales.
  - Hypothèses proposées pour la modélisation numérique.

## Références bibliographiques

- [1] **F. E. Kennedy**, Modern tribology handbook, Chapter: Frictional heating and contact temperatures. CRC Press LLC, 2001.
- [2] **P. Palanikumar a, N. Gnanasekaran b, K. Subrahmanya a, Vadivuchezhian Kaliveerana**, Effect of sliding speed and rise in temperature at the contact interface on coefficient of friction during full sliding of SS304, Materials Today: Proceedings 27 (2020)
- [3] **Yunpeng Weia,c, Yaping Wua, Kun Chenb, Anyuan Suna**, Experiment research on friction coefficient between a steel plate and rail in transient sliding thermal contact through a pendulum, Results in Physics 11 (2018)
- [4] **D. Bekhouche, A. Bouchoucha, H. Zaidi, Y. Mouadji** : Etude de l'influence du paramètre charge sur le comportement en frottement et usure du couple dynamique sec bronze-acier, volume 44(2015), pp 17-21.
- [5] **M. Belatreche, H. Bahbouh et I. Boumaad** : Détermination Expérimentale et Numérique de la Température d'un contact glissant ; Projet de fin d'étude ; université de Jijel (2018).
- [6] **Y.Soufane, A.Bouassria** : Etude expérimentale des paramètres thermiques et mécaniques du cuivre, laiton et bronze en contact dynamique sec avec l'acier ; Projet de fin d'étude ; université de Jijel (2019).
- [7] **D. Abdenasser**, Contribution à la compréhension des modes d'action tribologique par usinage, Projet de fin d'étude, Université de M'sila, 2016.
- [8] **Jean Frêne**, La tribologie de L'antiquité a nos jours ; Mécanique& Industries · January 2001.
- [9] **M. CARTIER, P. KAPSA**, Usure des contacts mécaniques – Eléments de tribologie, techniques de l'Ingénieur BM5066, p. 1-13, 2001
- [10] **N. Aderghal**, Répartition des flux de chaleur générés par frottement mécanique et modélisation des températures à l'interface des contacts dynamiques Cuivre-Acier et Cuivre-Graphite, thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2012.

- [11] **S. Senhadji** : Etude expérimentale du comportement au frottement et à l'usure en contact plan du laiton et du bronze en milieu lubrifié .Physique.2018.
- [12] **H. Silem**, Etude de l'effet de la charge normale appliquée sur le comportement tribologique des couples métalliques, mémoire de master, Université de M'sila, 2016.
- [13] Tribologie, Brunetière, 2016\_PDF.
- [14] [http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-du-solide/charbonnieras/mecanique/132\\_lois\\_du\\_frottement\\_sec\\_lois\\_de\\_coulomb.html](http://public.iutenligne.net/mecanique/mecanique-du-solide/charbonnieras/mecanique/132_lois_du_frottement_sec_lois_de_coulomb.html)
- [15] **Denape, N. Laraqi**, Aspect thermique du frottement: mise en évidence expérimentale et éléments de modélisation, Mécanique&Industries, 1,563-579,2000.
- [16] **J. Dhersn** (1978).Usure avaries corrosion, Facteurs de destruction des matériels industriels.
- [17] **M. Braunovic, V. V. Konchits** and **N. K. Myshkin**, Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology, (New York CRC press), 2006.
- [18] **A. Benfoughal**, Analyse tribologique et thermique d'un matériau composite carbone dans un contact électrique.
- [19] [http://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Usure\\_des\\_surfaces](http://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie/Usure_des_surfaces).
- [20] Automne 2009, PHS6317 – Nano ingénierie des couches minces 2
- [21] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-acier-16510/>
- [22] **Murray G**, Métaux alliages propriétés, In Minis ni PH, Métallurgie, 2ed, Dunod, Paris, 2004, 2010.
- [23] **CHAMPAGNE, Victor K. ET HELFRITCH, Dennis J.** A démonstration of the antimicrobial effectiveness of various copper surfaces. *Journal of biological engineering*, 2013, vol. 7, no 1, p. 8.

[24] <http://www.universal-aciers.fr>

[25] [www.aciers-premium.fr](http://www.aciers-premium.fr)

[26] **H. S. Carslaw and J. C. Jaeger**, Conduction of Heat in Solids, second edition, Clarendon Press, Oxford, 1959

# Résumé

Dans ce travail, on a étudié expérimentalement et numériquement les paramètres thermiques et mécaniques d'un contact dynamique : pion en cuivre et disque en acier. On a utilisé un tribomètre pion-disque pour la réalisation de ce travail. Les calculs numériques ont été effectués par le code de calcul COMSOL MULTIPHYSICS. On a pu déterminer, en régime transitoire et stationnaire, la température du pion, le coefficient de partage, le coefficient de frottement et l'usure. Les résultats obtenus ont montré que la charge normale et la vitesse de glissement ont une influence significative sur la variation de la température du pion ainsi que la perte de masse.

## Mots clés :

Frottement, usure, charge normale, vitesse de glissement, coefficient de partage, température, cuivre, acier.

## ملخص

في هذا العمل ، درسنا تجريبياً وعددياً المعلمات الحرارية والميكانيكية للتلامس الديناميكي: بيون نحاسي وقرص فولاذي. تم استخدام جهاز قياس ثلاثي قرص بيون لهذا العمل. تم إجراء الحسابات الرقمية بواسطة رمز الحساب COMSOL MULTIPHYSICS. كان من الممكن تحديد درجة حرارة الدبوس ومعامل التقسيم ومعامل الاحتكاك والتآكل في نظام عابر وثابت. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الحمل الطبيعي وسرعة الانزلاق لهما تأثير كبير على تغير درجة حرارة الرواد وكذلك فقدان الكتلة.

## الكلمات المفتاحية :

الاحتكاك ، التآكل ، الحمل العادي ، سرعة الانزلاق ، معامل التقسيم ، درجة الحرارة ، النحاس ، الفولاذ.

## Abstract

In this work, we experimentally and numerically studied the thermal and mechanical parameters of a dynamic contact: copper pion and steel disc. A pion-disc tribometer was used for this work. The numerical calculations were carried out by the computation code COMSOL MULTIPHYSICS. It was possible to determine, in transient and stationary regime, the temperature of the pin, the partition coefficient, the coefficient of friction and wear. The results obtained showed that the normal load and the sliding speed have a significant influence on the variation of the temperature of the pion as well as the loss of mass.

## Keywords:

Friction, wear, normal load, sliding speed, partition coefficient, temperature, copper, steel.