



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

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

Thème

**Etude tribologique d'un contact glissant :
modélisation par éléments finis**

Présenté et soutenu par :

BRIKA Diae ddine

et

KESKESSA Djaafar

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme M. TALHI	MCB	Université d'Oran 2	Président
Mme S. SENHADJI	MCB	Université d'Oran 2	Encadreur
Mr R. YAHIAOUI	MCB	Université d'Oran 2	Examineur

Année 2019/2020

Remerciements

Nous remercions Allah de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce travail.

Nous remercions notre encadreuse Mme SENHADJI Salima, enseignante à l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle d'Oran2 qui m'a apporté ses conseils tout au long de ce travail et qui m'a consacré de son temps personnel.

Nous tenons à remercier vivement Madame M.TALHI, enseignante à l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle d'Oran2 pour avoir accepté la présidence du jury de ce mémoire.

Nous tenons à remercier vivement Monsieur R.YAHIAOUI, enseignant à l'Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle d'Oran2 qui a accepté d'examiner ce travail.

Dédicace

Nous tien à dédier ce modeste travail à :

À nos parents,

À nos frères,

À nos sœurs,

À nos familles,

À tous nos amis et nos collègues.

Sommaire

Sommaire.....	1
Liste des figures.....	3
Introduction générale.....	5

Chapitre I : Eléments bibliographiques

I.1. La tribologie.....	7
I.2. Le système tribologique	8
I.3. Le triplet tribologique	9
I.4. Contact entre surfaces solides	10
I.5. Phénomènes observables dans un contact	11
I.5.1. Le frottement	11
I.5.2. L'usure	14
I.5.2.1. Les différents mécanismes d'usure	15
I.5.3. Les phénomènes thermiques	18
I.6. Influence des différents paramètres sur le comportement du contact	20
I.7. Types de contact dans un système tribologique	21

Chapitre II : Généralité sur les matériaux d'études

II.1. Les métaux	23
II.1.1. Propriétés des métaux et des alliages	23
II.2. Les matériaux d'étude	24
II.2.1. Caractérisation du laiton $CuZn39Pb2$	25
II.2.2. Caractérisation du bronze $CuSn9Pb$	26
II.2.3. Acier XC42	28

Chapitre III : Modélisation numérique et Résultats

III.1 Introduction	29
III.2 Introduction sur les éléments finis	29
III.3. Démarche éléments finis	29
III.4 Présentation du logiciel	30
III.4.1 Logiciels de calcul par éléments finis	30
III.4.2. Les éléments utilisés par ABAQUS	31
III.5. Procédure de la modélisation	32
III.6. Les résultats de la simulation	38
Conclusion générale.....	42
Références bibliographique	

Liste des figures

Chapitre I : Elements bibliographiques

Figure I.1 : Concept triangle illustrant l'interaction des sciences basiques, qui sont impliqués dans la tribologie.	8
Figure I.2 : Principaux éléments du contact tribologique.	9
Figure I.3 : Modèle du frottement des surfaces en contact	10
Figure I.4 : Frottement de glissement.....	12
Figure I.5 : Frottement de pivotement.....	12
Figure I.6 : Frottement de roulement.	13
Figure I.7 : Perte de masse en fonction du temps [5].....	14
Figure I.8 : Importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie [6].	15
Figure I.9 : Mécanisme de l'usure adhésive.....	16
Figure I.10 : Mécanisme de l'usure abrasive.	16
Figure I.11 : Etat de surface présentant une usure par corrosion.	17
Figure I.12 : Fissures générées par fatigue.....	17
Figure I.13 : Notions de température de surface produite sur l'aire (apparente) de contact (surface de frottement) et de température éclair générée sur l'aire réelle de contact.....	18
Figure I.14 : Configuration du contact.....	20

Chapitre II : Généralité sur les matériaux d'études

Figure II.1: Diagramme d'équilibre des laitons binaires.....	24
Figure II.2 : Diagramme d'équilibre des bronzes binaires.....	26

Chapitre III : Modélisation numérique et Résultats

Figure III.1 : Schéma présent l'utilisation langage de script Python [11].....	29
Figure III.2: Structure d'une analyse sous Abaqus [12].....	30
Figure III.3 : Quelques éléments parmi les plus utilisés (document Abaqus) [13].....	30
Figure III.4 : Création des pièces.	31
Figure III.5 : Propriété de l'acier.....	32
Figure III.6 : Assemblage des pions et bloc.	32
Figure III.7 : Création de step.	33

Figure III.8 : Module interaction.....	33
Figure III.9 : Création de la pression sur le pion.....	34
Figure III.10 : Création de la vitesse sur le bloc.	34
Figure III.11 : Insertion de la température initiale.	34
Figure III.12 : La taille des éléments de maillage.....	35
Figure III.13 : Lancement du calcul.....	35
Figure III.14 : Distribution de la température.	36
Figure III.15 : La température du laiton à une pression de 10 MPa et une vitesse de 2 m/s à l'instant (0.018s).....	36
Figure III.16 : La température de surface du bloc à pression de 10 MPa, vitesse 2m/s à l'instant (0.018).	36
Figure III.17 : la variation de la température pour V=1m/s et P=10MPa.	37
Figure III.18 : la variation de la température en fonction de la vitesse à P=10MPa.	38
Figure III.19 : Variation de la température du laiton en fonction de Longueur en volume	39

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Propriétés de laiton.....	25
Tableau II.2 : propriétés du bronze.	26
Tableau II.3: Propriétés de l'acier XC42.....	27

Introduction

Tous les systèmes mécaniques sont généralement des ensembles plus ou moins complexes d'éléments de machine. Le comportement tribologique du contact de ces éléments est fortement influencés par la micro géométrie de chacune des pièces. Les surfaces de contact mobiles au sein de ces éléments et les influences entre elles, sont les points critiques du point vue fonctionnel.

Le contact est un domaine pluridisciplinaire, en effet il fait appel aux domaines de la mécanique, du frottement, du comportement des matériaux et de la thermique. C'est un problème multi-échelles allant des effets microscopiques aux phénomènes macroscopiques de dissipation de chaleur ou de déformation structurales,

De nombreuses applications dans les systèmes mécaniques nécessitent la compréhension des phénomènes de contact, tel que le système des freins, les embrayages, les engrenages, ect.

La connaissance des températures de contact est un élément précieux pour l'étude du comportement tribologique des matériaux en contact glissant, mais il est difficile de déterminer expérimentalement la température à cause de mouvement des corps, des déformations plastiques des matériaux en contact et aux changements des propriétés mécaniques (rugosité...etc.) lors de l'élévation de cette dernière.

De nos jours, la simulation informatique joue un rôle prépondérant dans la science et de l'ingénierie. Plusieurs méthodes numériques ont été développées comme celle des éléments finie pour avoir une estimation de la température mais ça reste limité en raison des hypothèses soumissent. Un grand choix d'options de simulation est disponible, ces logiciels utilisent des langages de programmation qui implémentent des méthodes de calcul avancées.

Dans ce contexte, nous avons réalisé une étude de simulation pour comparer le comportement thermique de deux nuances d'alliage de cuivre, de dureté comparable, à savoir : le laiton (CuZn39Pb2) et le bronze (CuSn9P) frottant contre un bloc en acier XC42. Notre objectif est d'étudier l'influence des différents paramètres (vitesse, surface de contact et type de matériaux) et évalué les élévations de températures dans un contact frottant à travers des modélisations par éléments finis par le logiciel Abaqus.

Le plan du mémoire se décompose en trois parties :

Le premier chapitre donne un aperçu sur les différents concepts de la tribologie, et les phénomènes observables lors de la mise en contact d'un système en mouvement relatif

Dans le second chapitre on présente les principaux matériaux utilisés dans notre travail et leur propriété physique.

Dans le troisième chapitre on a présenté une petite introduction sur la modélisation numérique faites avec le logiciel ABAQUS avec toutes les étapes qu'on a suivi pour la réalisation du calcul numérique, ainsi que les différents résultats de la simulation des deux couples glissant.

CHAPITRE I
Éléments bibliographiques

I.1. La tribologie

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques *tribein* (frotter) et *logos* (parole, étude ou science), a été proposé en 1968 par G. Salomon pour désigner la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. La tribologie présente trois aspects distincts: le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. Il s'agit donc d'une science pluridisciplinaire s'appuyant à la fois sur les bases fondamentales de la mécanique et sur les acquisitions récentes de la science des matériaux, en passant par la physico-chimie des surfaces (figure I.1).

La tribologie s'est tout d'abord intéressée principalement au volume des matériaux en contact par la détermination des lois de comportement de frottement et d'usure (approche mécanique). Puis, la tribologie des surfaces a fait son apparition associée à la physico-chimie des surfaces (approche matériaux) pour enfin arriver à la tribologie Des interfaces (approche complémentaire mécanique / matériaux). Cette dernière notion a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure. Les phénomènes de frottement ne sont pas satisfaisants par des propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement délicate. En outre, le frottement et l'usure sont des phénomènes indépendants. Il est en effet possible de concevoir des systèmes à usure faible et frottement élevé (freins) ou à usure forte et frottement faible (usinage). Enfin, l'introduction de la notion de contact à trois corps, qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de vitesse, a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure[1].

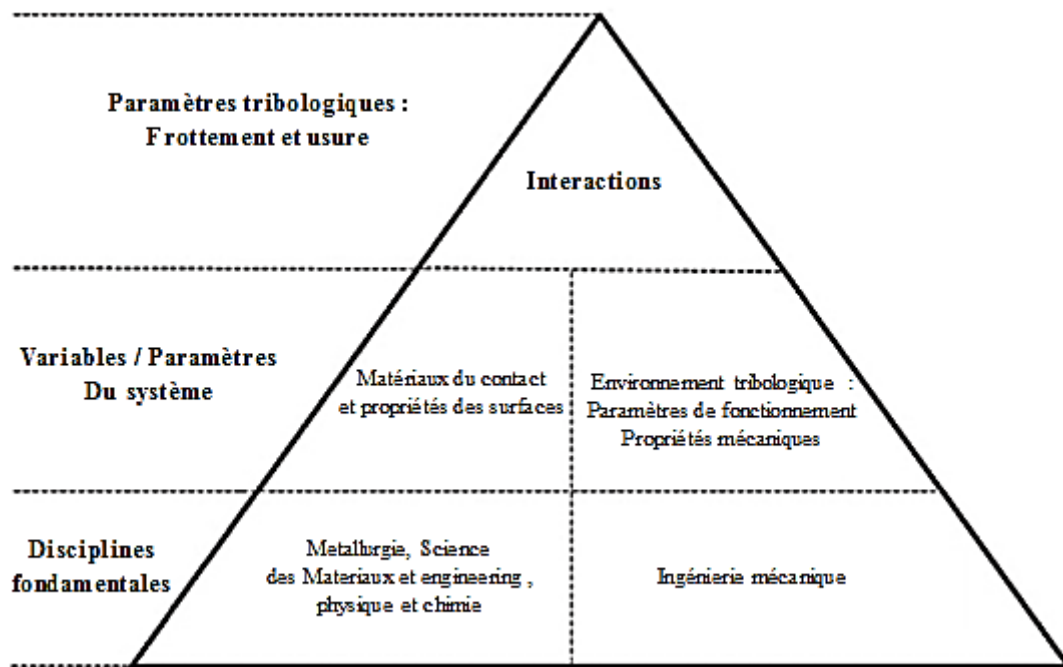


Figure I.1 : Concept triangle illustrant l'interaction des sciences basiques, qui sont impliqués dans la tribologie.

I.2. Le système tribologique :

La tribologie des interfaces concerne le milieu inter facial entre les deux corps en contact. On définit ainsi un système tribologique ou tribosystème comme étant composé de trois éléments principaux (Figure I.2): deux solides A et B en contact (premiers corps) et le milieu inter facial I désigné sous le terme de troisième corps. Ce troisième corps sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de celles des premiers corps. L'origine de ce milieu inter facial peut être externe (lubrifiant solide ou liquide) ou interne par formation in situ (détachement de particules des premiers corps).

Ce tribosystème se trouve dans un environnement E qui constitue l'ambiance de fonctionnement du contact. Des interactions entre cet environnement et le contact peuvent ainsi avoir lieu en fonction de sa composition, sa température, sa pollution éventuelle.

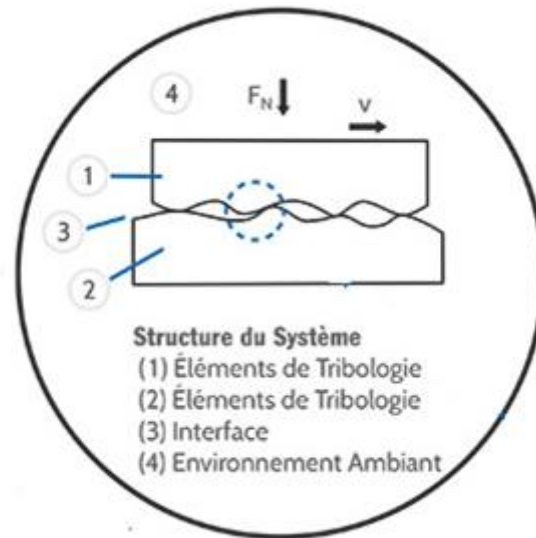


Figure I.2 : Principaux éléments du contact tribologique.

I.3. Le triplet tribologique:

Le triplet tribologique ou le système tribologique est un système mécanique composé par :

a. Les premiers corps :

Ce sont les matériaux délimitant le contact et à travers lesquels les efforts sont transmis. Ils interviennent par leurs structures et leurs propriétés thermomécaniques, en induisant des déformations qui à leur tour définissent la zone de contact élémentaire.

Les contraintes locales sont générées par le chargement normal et le déplacement tangentiel imposé, et affectent le volume du matériau. La profondeur (pénétration) affectée par ces contraintes locales avoisine en général $50 \mu\text{m}$.

b. Le troisième corps :

C'est le volume de matière séparant les premiers corps. Des particules élémentaires sont détachées d'un ou des deux premiers corps et s'agglomèrent. Cet agglomérat de particules constitue le troisième corps, ces particules peuvent être piégées ou refoulées du contact. Le troisième corps est dit naturel lorsqu'il est formé par l'un ou les deux premiers corps ou artificiel lorsqu'il est injecté dans l'interface [2].

c- Le milieu ambiant (E) :

Il constitue le milieu des échanges du contact avec l'extérieur. Cet environnement joue un rôle déterminant suite aux interactions qui peuvent exister en fonction de sa composition, sa température et sa pollution [3].

I.4. Contact entre surfaces solides :

Lorsque deux surfaces rugueuses sont mises en contact sous une charge normale P (figure I.3), elles se touchent en de nombreux points. Cependant, l'aire de ces microcontacts ne représente généralement qu'une faible portion de l'aire apparente du contact [4] donc La vraie surface de contact A_r (surface réelle) est égale à la somme de toutes les surfaces de contact entre les aspérités.

$$A_r = \sum A_i$$

I.1

Généralement A_i est inférieure à la surface de contact géométrique A . Sa valeur dépend de la force normale F_N et de la dureté du matériau.

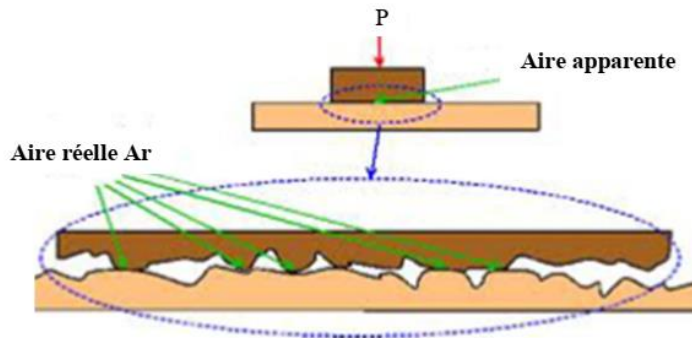


Figure I.3 : Modèle du frottement des surfaces en contact

Durant le contact de deux surfaces, le contact se produira d'abord en quelques points seulement pour supporter la charge normale (force). Au fur et à mesure que la charge normale augmente, les surfaces se rapprochent, un plus grand nombre d'aspérités sur les deux surfaces entrent en contact, et les contacts existants se développent pour supporter la charge croissante. La déformation se produit dans la région des points de contact, établissant des contraintes qui s'opposent à la charge appliquée [4].

I.5. Phénomènes observables dans un contact :

Un certain nombre de phénomènes physiques peut se manifester lors du fonctionnement d'un système tribologique. Les plus évidents sont le frottement, l'usure et les phénomènes thermiques.

I.5.1. Le frottement:

Le frottement est la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide se déplace tangentiellement par rapport à une surface antagoniste. Le comportement au frottement dépend de la composition et de la microstructure des matériaux, des conditions de mesure et du système tribologique.

On distingue différents types de frottement :

a- Frottement de glissement :

C'est le cas le plus fréquent, il intervient lors du déplacement d'un solide A sur un autre B. F est la force parallèle au plan tangent commun d'A et B, c'est la force nécessaire à un glissement permanent. N c'est la force normale au plan tangent commun de A et B, Le coefficient de Frottement de glissement μ est une grandeur sans dimension, il est donné par la relation suivante [2] :

$$\mu = \frac{F}{N} \quad \text{I.2}$$

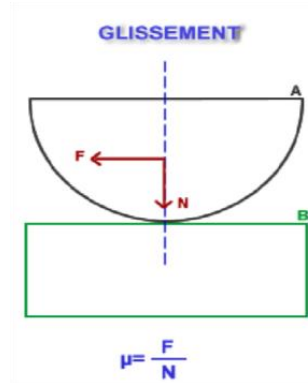


Figure I.4 : Frottement de glissement.

b- Frottement de Pivotement :

Un point en A coïncide pendant tout le mouvement avec un point donné en B. Le mouvement est obtenu en exerçant un couple C qui nécessaire au mouvement. Le coefficient de frottement de pivotement est donné par [2] :

$$\mu = \frac{C}{N}$$

I.3

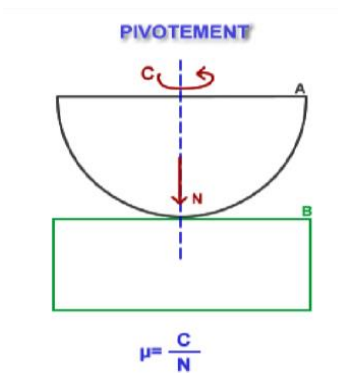


Figure I.5 : Frottement de pivotement.

c- Frottement de Roulement :

Un point de contact (ou une ligne) d'A et de B joue le rôle de centre instantané de rotation. Dans le mouvement, la direction de la force N se déplace parallèlement à elle-même d'une longueur H. Le coefficient de Frottement de Roulement c'est le rapport, dans la direction du mouvement, du bras de levier H de la force appliquée au rayon R de la bille [2] :

$$\mu = \frac{H}{R}$$

I.4

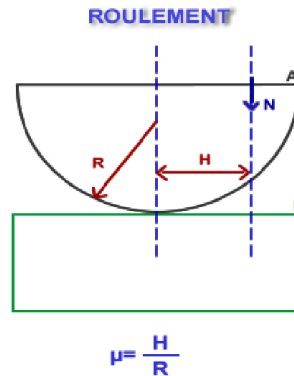


Figure I.6 : Frottement de roulement.

Si le coefficient de frottement est élevé, il y'a risque de grippage (blocage, paralysie, ...etc.).

Le frottement peut être lubrifié dans le cas où un film est introduit entre les surfaces de deux corps massifs en mouvement relatif. Ce lubrifiant peut être un fluide plus ou moins visqueux (huiles, graisses, émulsions) ou des particules solides (graphite, bisulfure de molybdène...).

On peut aussi rencontrer les frottements secs qui se produisent lorsque les solides sont en contact direct ; aucun corps n'est interposé entre les surfaces à l'exception des débris d'usure. Les lois régissant le frottement lubrifié font appel à la mécanique des fluides tandis que le frottement sec requiert la prise en compte de phénomènes mécaniques et physico-chimiques.

Parmi les conséquences du frottement les plus manifestées on peut citer :

- Le vieillissement des surfaces ;
- L'apparition de contraintes qui produisent l'écrouissage ;
- La création de chaleur ;
- L'oxydation des surfaces.

I.5.2. L'usure :

L'usure d'un solide est généralement définie comme une perte de matière, un mouvement de matière ou une transformation de matière en surface du solide sous l'effet d'une interaction avec un autre milieu.

Parmi les effets observables de l'usure et la variation de masse qui peut être présente par le diagramme suivant :

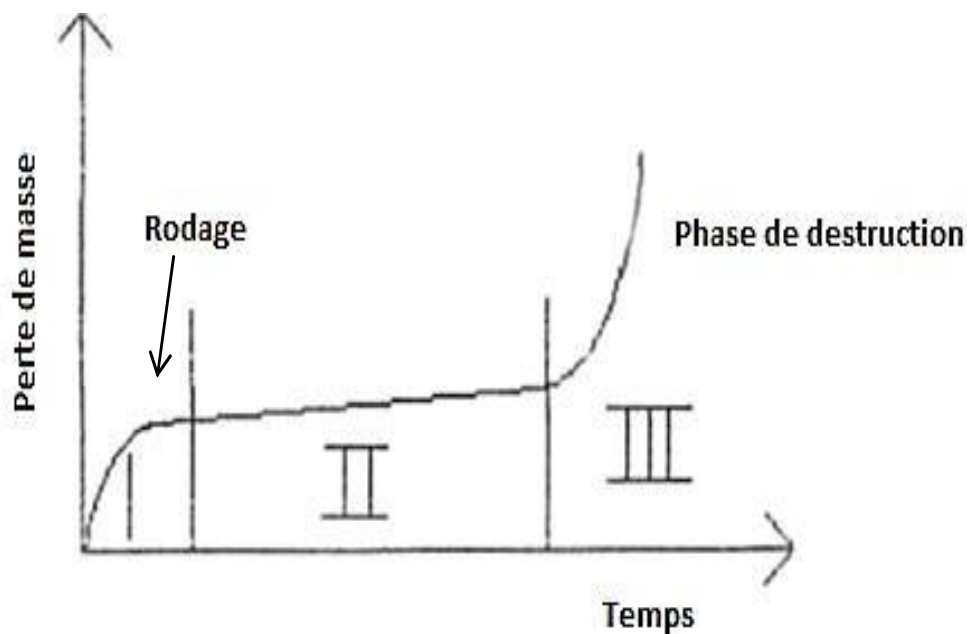


Figure I. 7 : Perte de masse en fonction du temps [5].

- **La première partie I (Phase de rodage):** Correspond à un arasage des aspérités de la surface des pièces mécaniques, et se caractérise par une croissance rapide de la perte de masse (usure rapide) et une amélioration de l'état de surface.
- **La deuxième partie II (phase d'usure linéaire) :** Correspond à un régime stationnaire où la perte de masse est lente (un taux d'usure constant), l'usure est pratiquement une fonction linéaire du temps de fonctionnement.
- **La troisième partie III (phase de destruction):** C'est un stade où la détérioration des éléments de machine évolue rapidement et entraîne la mise hors service du matériel. Ce phénomène est désigné comme état de grippage.

I.5.2.1. Les différents mécanismes d'usure :

Les mécanismes de dégradation des matériaux provoquant le détachement des particules des premiers corps (débit source interne) et conduisant à l'usure sont classés selon plusieurs familles dont les principales sont décrites ci-dessous. Ces phénomènes d'usure peuvent, en théorie, se produire simultanément, certains étant prépondérants par rapport à d'autres en fonction du tribosystème étudié.

Des auteurs [6] ont proposé une répartition des mécanismes à l'origine de l'usure dans l'ensemble des milieux industriels. Des exemples de surface usée par ces mécanismes sont présentés sur la figure I.8.

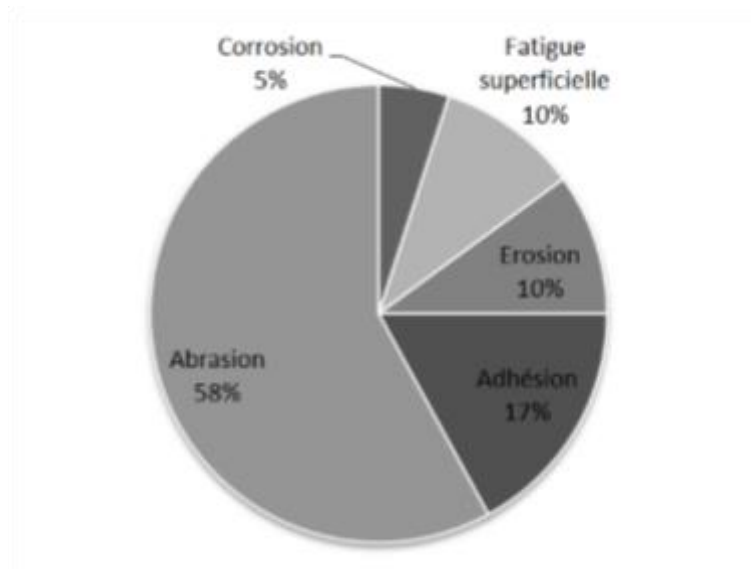


Figure I.8 : Importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie [6].

La classification la plus courante des différents types d'usure est la suivante :

a- Usure adhésive :

Elle se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre, soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physicochimique. Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées [7].

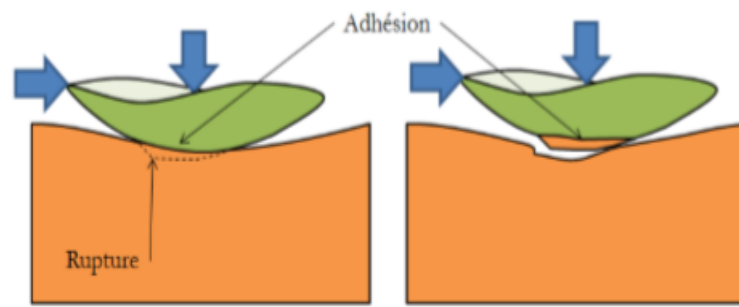


Figure I.9 : Mécanisme de l'usure adhésive.

b- Usure abrasive :

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures. Elle est donc le résultat du frottement de glissement par labourage ou par déformation plastique. L'usure peut se faire à deux corps, directement à partir des solides en contact ou bien à trois corps comme l'indique la figure I.10.

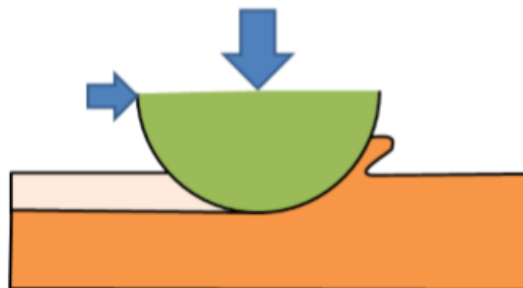


Figure I.10 : Mécanisme de l'usure abrasive.

L'usure abrasive est généralement limitée en augmentant la dureté du matériau le plus tendre. Dans le cas d'abrasion à deux corps, il est souhaitable de réduire l'index de plasticité afin de rester en régime élastique et limiter le labourage d'une des surfaces.

c- Usure corrosive :

C'est un système à trois composantes, où intervient la réactivité chimique entre les surfaces. On a une réactivité chimique avec le milieu environnant et une réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de

plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement [8].

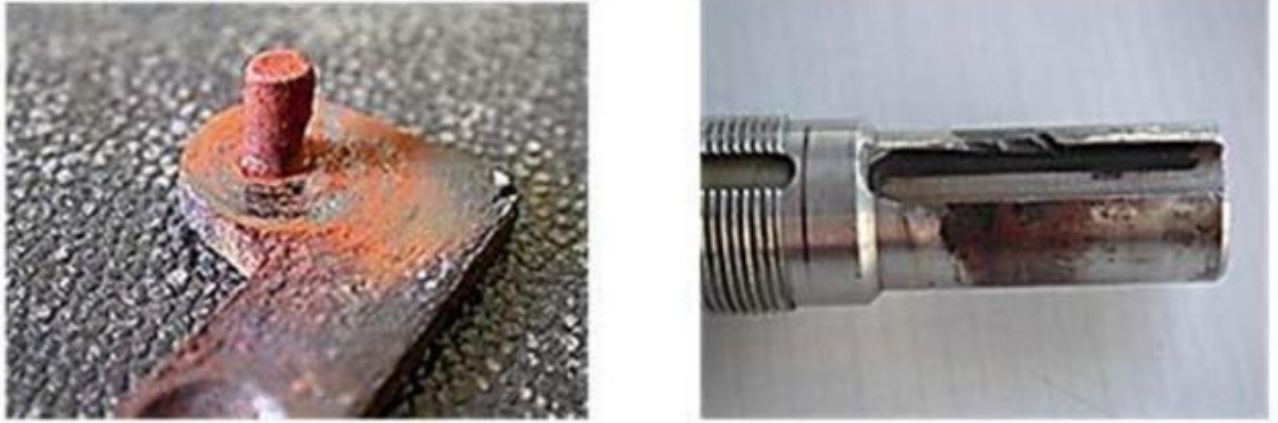


Figure I.11 : Etat de surface présentant une usure par corrosion.

d- Usure par fatigue :

La fatigue est le phénomène de formation et de propagation de fissures (figure I.12) sous l'action répétée d'efforts alternés. L'usure par fatigue est lente est induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement. Des charges trop fortes peuvent détériorer les surfaces. On peut remarquer des déformations plastiques sur les métaux ductiles et des cassures sur les matériaux fragiles.

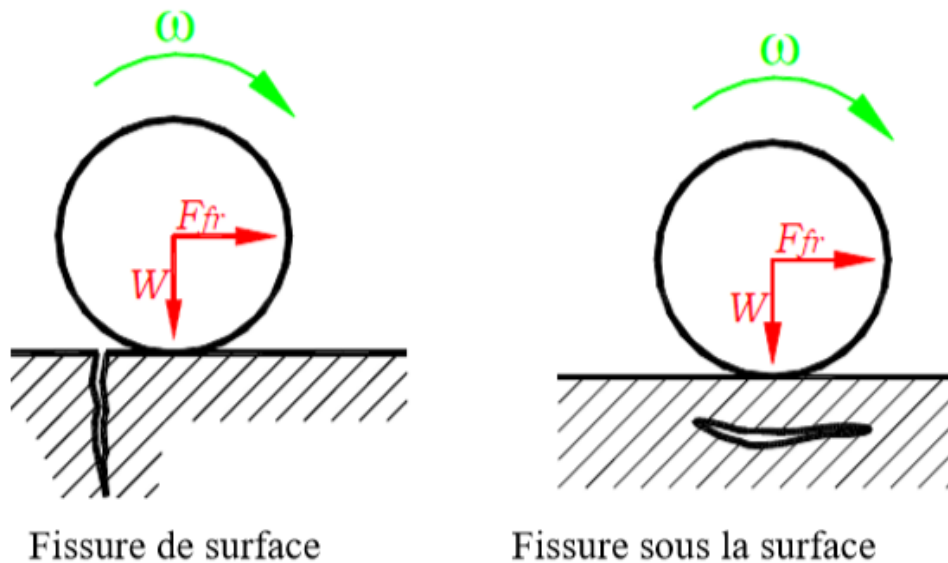


Figure I.12 : Fissures générées par fatigue.

I.5.3. Les phénomènes thermiques

L'échauffement des surfaces de contact, généré par le frottement, présente 95% des pertes énergétiques. La température de surface contribue aux phénomènes chimiques, thermodynamiques et rhéologiques, qui se manifestent dans le contact et jouent un rôle important dans le comportement tribologique des matériaux [9]. Cette température englobe la température ambiante, l'échauffement moyen général et l'échauffement local instantané et elle est donnée par :

$$T_C = T_a + T_m + T_e \quad \text{I.5}$$

Cette chaleur se dissipe dans le milieu environnant et dans chacun des deux solides .Dans certain cas extrême de frottement, la température de l'interface peut atteindre des valeurs très élevées, pouvant conduire à des transformations de phases dans la zone adjacente à la surface de contact et par la suite à des dégradations plus sévères de l'état de surface et de leur comportement tribologique.

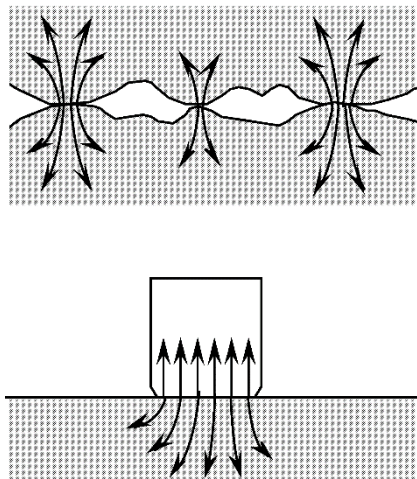


Figure I.13 : Notions de température de surface produite sur l'aire (apparente) de contact (surface de frottement) et de température éclair générée sur l'aire réelle de contact.

La production de chaleur dans un contact frottant est attribuée au cisaillement rapide des extrémités des aspérités (jonctions) de l'aire réelle de contact. Il s'agit donc d'événements locaux et brefs à l'origine de la notion de température éclair. La chaleur

est alors transmise par conduction sur l'aire géométrique de contact dont la température est alors désignée par température moyenne de contact (figure I.13).

I.5.3.i Température de contact

Le frottement entre deux surfaces conduit à la transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique. Durant la phase initiale, la température augmente; elle atteint ensuite un état stationnaire lorsque la chaleur produite équivaut à la chaleur dissipée par conduction. La quantité d'énergie thermique produite lors du glissement d'un matériau sur la surface d'un autre est proportionnelle à la force de frottement F ainsi qu'à la vitesse de déplacement est donnée par la relation suivante :

$$Q_f = \frac{f \cdot F_N \cdot v}{A} \quad \text{I.6}$$

A l'état stationnaire, la conduction thermique a lieu à travers les deux matériaux formant le contact, le flux thermique Q_1 dans le matériau 1 vaut :

$$Q_1 \approx K_1 \frac{T_S - T_0}{L_1} \quad \text{I.7}$$

K_1 : Conductivité thermique du matériau 1.

T_S : Température à la surface de contact.

T_0 : Température à une distance caractéristique.

L_1 : Distance de conduction thermique, épaisseur du matériau 1.

Le flux thermique Q_1 ne représente qu'une fraction θ_1 de la chaleur totale Q_f dissipée.

$$Q_1 = \theta_1 \cdot Q_f \quad \text{I.8}$$

$$k_1 = \frac{T_S - T_0}{L_1} = \frac{\theta_1 f F_N v}{A} \quad \text{I.9}$$

$$T_S = T_0 + \frac{\theta_1 f F_N v L_1}{k_1 A} \quad \text{I.10}$$

La température moyenne de la surface est donc proportionnelle au coefficient de frottement f , à la force normale F_N et à la vitesse de déplacement v . La valeur de θ_1 , dépend du rapport des conductivités thermiques des matériaux en contact, pour des matériaux identiques $\theta_1 \approx 0,5$. Dans certains cas extrêmes de frottement, la température de l'interface peut atteindre des valeurs très élevées, pouvant conduire à des transformations de phases dans une zone adjacente à la surface de contact. En présence de métaux à basse température de fusion comme le plomb, l'étain ou le zinc; l'échauffement local suffit à fondre le métal.

En raison de leur rugosité, les surfaces ne se touchent généralement qu'aux aspérités. Lorsqu'un mouvement relatif les anime, le contact entre deux aspérités n'a lieu que pour un court instant, cependant, la pression de contact devient très élevée. Une quantité importante d'énergie mécanique se transforme alors en chaleur, ce qui augmente localement la température temporairement. La température à la surface d'une aspérité peut aussi dépasser de beaucoup la température moyenne T_s , on parle alors d'une pointe de température. Ces pointes de température modifient localement les propriétés du matériau et accélèrent les réactions chimiques.

I.6. Influence des différents paramètres sur le comportement du contact :

Les paramètres prédominants, dans tout type de contact, sont :

- les matériaux ;
- la cinématique du contact ;
- la charge ;
- l'environnement ;
- la microgéométrie.

a- Influence du matériau :

La nature des matériaux des surfaces en contact a un rôle décisif dans le comportement général du système tribologique. Selon les fonctions tribologiques que doit assurer le contact, le choix des matériaux dépendra de leurs propriétés mécaniques et physicochimiques.

b- Influence de la cinématique du contact :

La cinématique décrit le mouvement entre les deux surfaces en contact. Il existe trois types de cinématique : roulement, glissement et pivotement. Le comportement du système tribologique peut être fortement affecté par la fréquence des sollicitations (continues, alternées ou répétées) qui se manifeste par des phénomènes de fatigue ou des difficultés du maintien du film lubrifiant.

c- Influence de la charge :

La charge et la manière dont elle est appliquée permettent d'évaluer la nature et le niveau des contraintes auxquelles les couches superficielles sont soumises. Le comportement du contact dépend de son intensité et de son évolution au cours du temps.

d- Influence du milieu environnant :

Le milieu dans lequel évolue le contact a une grande influence sur le comportement tribologique du système. Cette influence dépend de :

- sa nature : liquide ou gaz.
- sa température.
- ses propriétés mécaniques et physiques : qui interviennent dans le comportement mécanique du contact ;
- ses propriétés chimiques : la réactivité du milieu ambiant avec les matériaux constituant les solides en contact.

e- Influence de la micro géométrie :

La microgéométrie est l'un des éléments d'appréciation de l'aire réelle de contact. Celui-ci met en jeu non seulement les aspects microgéométriques, mais aussi les interactions moléculaires inter-faciales et les forces de surface qui sont largement tributaires de la physicochimie de la surface. [2]

I.7. Types de contact dans un système tribologique :

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participeront en particulier à l'évaluation du champ de contrainte imposé au contact. Par nature du contact, on entend la définition générale de ce qui constitue le contact: solide/solide liquide/solide, liquide et particule/solide, liquide et vapeur/solide, etc. la géométrie du contact caractérise la forme générale des surfaces qui limitent les solides au voisinage

de la zone de contact. On constate que l'ensemble de contacts que l'on rencontre en génie mécanique peut se regrouper en trois grandes familles (Figure I.13) :

- Les contacts de type ponctuel (typiquement sphère/plan).
- Les contacts linéiques (typiquement cylindre/plan).
- Les contacts surfaciques (typiquement parallélépipède/plan).

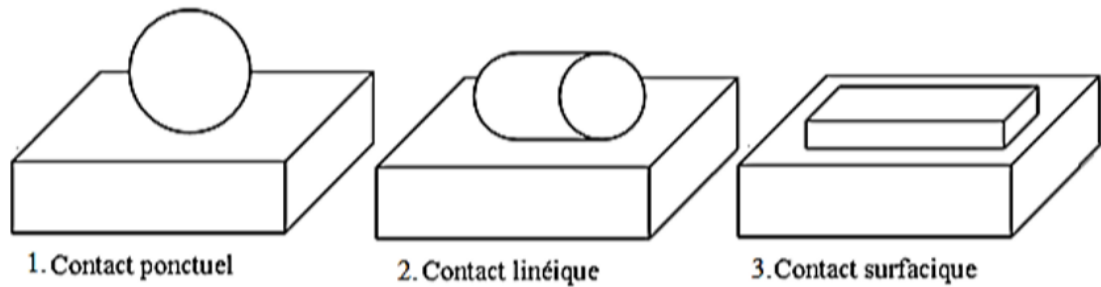


Figure I.14 : Configuration du contact.

Les deux premières familles constituent le contact hertzien ou contacts concentrés. Le contact ponctuel est mis en œuvre dans des applications mécaniques telles que le contact roue/rail de chemin de fer, les contacts billes/bagues des roulements à billes, certains contacts came/poussoir ou came/linguet de moteurs thermiques, etc. le contact linéique est utilisé par exemple dans les roulements à rouleaux cylindriques ou coniques, ou dans les engrenages à denture droite à profil en développement de cercle. Ces deux premiers types de contacts sont virtuels car, dès que l'on applique un effort, une déformation élastique de la zone de contact se produit, induisant une aire de contact capable de supporter raisonnablement la charge appliquée. Les théories initiées par Hertz ont permis de modéliser ces contacts d'une manière très fidèle, en déterminant l'aire de contact et le champ de contraintes induit par les efforts appliqués.

Chapitre II

Généralité sur les matériaux d'études

II.1. Les métaux :

Ce sont les éléments chimiques qui possèdent des indices caractéristiques tels que la dureté, la ténacité, une bonne conductibilité thermique et électrique, la meilleure caractéristique des métaux est la ductilité et la soudabilité. Parmi tous les éléments chimiques, les métaux et leurs alliages restent les plus utilisés dans l'industrie de façon générale, les métaux les plus réponsus en nature sont le fer et l'aluminium, le cuivre et ses alliages.

II.1.1. Propriétés des métaux et des alliages :

Les principales propriétés des métaux sont classées généralement en quatre catégories :

a- Propriétés physiques :

Les métaux sont caractérisés par : La couleur, le poids spécifique, la température de fusion, la dilatation thermique, la conductibilité thermique, la conductibilité électrique et les propriétés magnétiques.

1- Par la couleur, on distingue les métaux ferreux qui sont le fer et ses alliages (l'acier et la fonte), et tous les autres métaux qui sont non ferreux.

2- Le poids spécifique du métal : c'est le rapport du poids total de métal à son volume ;

3- La température de fusion : c'est la température à laquelle le métal passe de l'état solide à l'état liquide ;

4- La dilatation thermique : c'est la capacité des métaux de se dilater pendant l'échauffement ;

5- La conductibilité thermique : c'est la capacité des métaux de conduire la chaleur ;

6- La conductibilité électrique : c'est la capacité des métaux de conduire le courant électrique ;

7- Les propriétés magnétiques : sont les propriétés des métaux de s'aimanter ou être attirer par l'aimant.

b- Propriétés chimiques :

Les propriétés chimiques des métaux et des alliages sont les propriétés qui déterminent leur attitude envers les influences chimiques de différentes ambiances actives (oxydabilité, dissolubilité, résistance à la corrosion).

c- Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des métaux et des alliages sont : La solidité, la dureté, l'élasticité, la plasticité, la résilience et la fragilité.

- 1- La solidité est la capacité des matières de résister à l'action des forces extérieures sans se détruire.
- 2- La dureté d'un métal détermine son pouvoir de résister à l'enfoncement d'une bille en acier ou d'un cône,
- 3- L'élasticité est la capacité des matières de se déformer et de reprendre sa forme et ses dimensions initiale après la cessation de l'action des forces extérieures.
- 4- La plasticité est la capacité des matières de changer sa forme et ses dimensions sous l'action des forces extérieures sans de détruire et de garder la déformation après la cessation de l'action des forces extérieures.
- 5- La résilience est caractérisée par la quantité de travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette subissant des chocs,

d- Propriétés technologiques

Ces propriétés présentent la capacité des métaux et des alliages de se prêter aux différentes espèces de traitement. Les propriétés technologiques sont : L'usinabilité, la soudabilité, la ductilité, la coulabilité.

II.2. Les matériaux d'étude :

Le cuivre et ses alliages sont des matériaux qui trouvent un large domaine d'application dans le secteur industriel. En effet, le cuivre lui-même est caractérisé par une bonne conductivité électrique et thermique et une résistance à la corrosion supérieure à la moyenne, où leurs propriétés leur permettent d'exceller. Cependant, la résistance à l'usure du cuivre est faible. Etant à la fois souple et ductile, les surfaces de cuivre pur sont facilement déformées et rayées, en particulier à des températures élevées. Afin de modifier les propriétés du cuivre pur, des éléments sont ajoutés à celui-ci afin d'obtenir des alliages répondant aux besoins spécifiques de chaque application.

Les deux alliages cuivreux qui ont été utilisés pour cette étude sont le laiton et le bronze qui présentent les frotteurs, et le matériau antagoniste est l'acier XC42.

II.2.1. Caractérisation du laiton $CuZn39Pb2$:

Parmi les métaux et alliages susceptibles d'être matricés, les laitons occupent une place prépondérante. Le terme générique de laiton couvre une importante gamme d'alliages dont le composant principal est le cuivre et l'élément d'addition est le zinc. Les laitons de matriçage sont des alliages cuivre-zinc avec addition de plomb. Ces alliages conjuguent une bonne plasticité à chaud avec une excellente usinabilité nécessaire aux opérations de finition. Leur principale caractéristique est une grande aptitude à la déformation à chaud, caractérisée par l'allongement à la température ou s'effectue l'opération de matriçage. La présence de plomb est principalement justifiée par les usinages ultérieurs à l'opération de matriçage. Cette teneur en plomb est limitée en pratique à 2,5 %.

Le laiton utilisé pour notre étude est de type $CuZn39Pb2$, qui contient 39% de zinc et 2% de plomb. D'après le diagramme de phase Cu-Zn (figure II.1), ce type de laiton est de nature biphasé. La phase α se caractérise par une bonne ductilité et une aptitude à la déformation à froid, Alors que la phase β est dure et fragile permettant ainsi, l'augmentation de la dureté du Matériau et favorisant le fractionnement des copeaux.

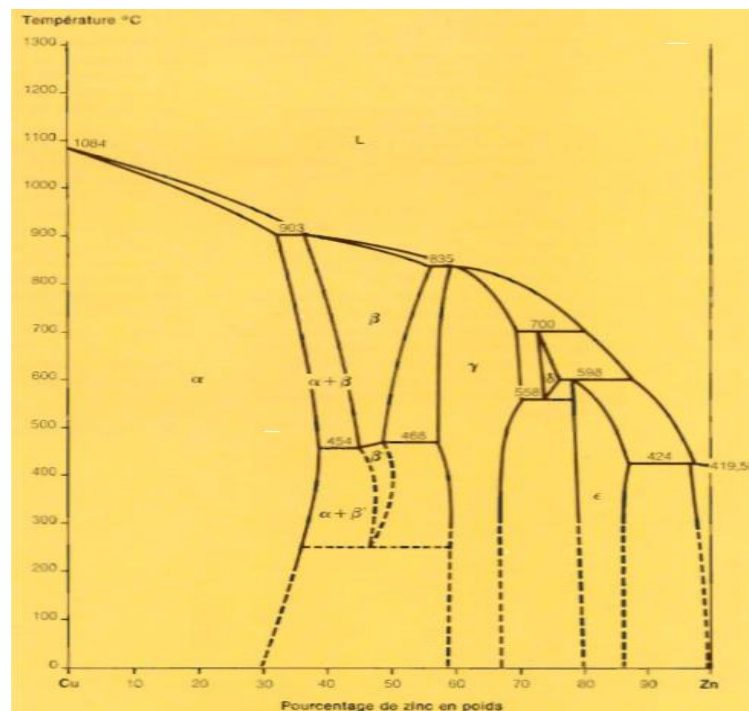


Figure II.1: Diagramme d'équilibre des laitons binaires.

L'alliage de base est le laiton CuZn39Pb2. Ses principales propriétés physiques sont Données au tableau II.1.

Paramètres		Valeur	Unité
Dureté	HV	170	Vickers
Masse volumique	ρ	8.45	g/cm^3
Module de Young	E	107	GPa
Limite élastique	σ_y	300	MPa
Résistance mécanique à la rupture	R_m	430	MPa
Coefficient de Poisson	ν	0.31	--
Allongement	$A\%$	8	--

Tableau II.1 : Propriétés de laiton.

Avantages de laiton : Plus dur que le cuivre, bonne résistance à la corrosion et grande facilité de mise en forme.

Inconvénient : Relativement fragile.

II.2.2. Caractérisation du bronze $CuSn9Pb$:

Le bronze est un alliage de Cuivre avec addition d'étain, bien que cette dénomination soit improprement utilisée pour désigner parfois d'autres alliages cuivreux tels que les cupro-aluminiums, les cupro-bérylliums ou les laitons au manganèse. L'appellation bronze est par extension utilisée pour désigner les alliages ternaires cuivre-étain-zinc.

Le bronze utilisé est le $CuSn9P$, dont le diagramme de phase Cu-Sn (figure II.2) indique qu'il est de nature monophasé (α). Cette phase, d'une structure cubique à faces centrées (CFC), est une solution solide de l'étain dans le cuivre.

Les bronzes au plomb, au phosphore et au manganèse ont en général une moindre aptitude au grippage que les laitons et un faible taux d'usure. L'addition d'étain donne une phase dure tandis qu'une addition de phosphore supérieure à 0.3% produit un composé intermétallique Cu_3P (le phosphure) qui améliore les propriétés élastiques et antifrictions et assure une structure résistante.

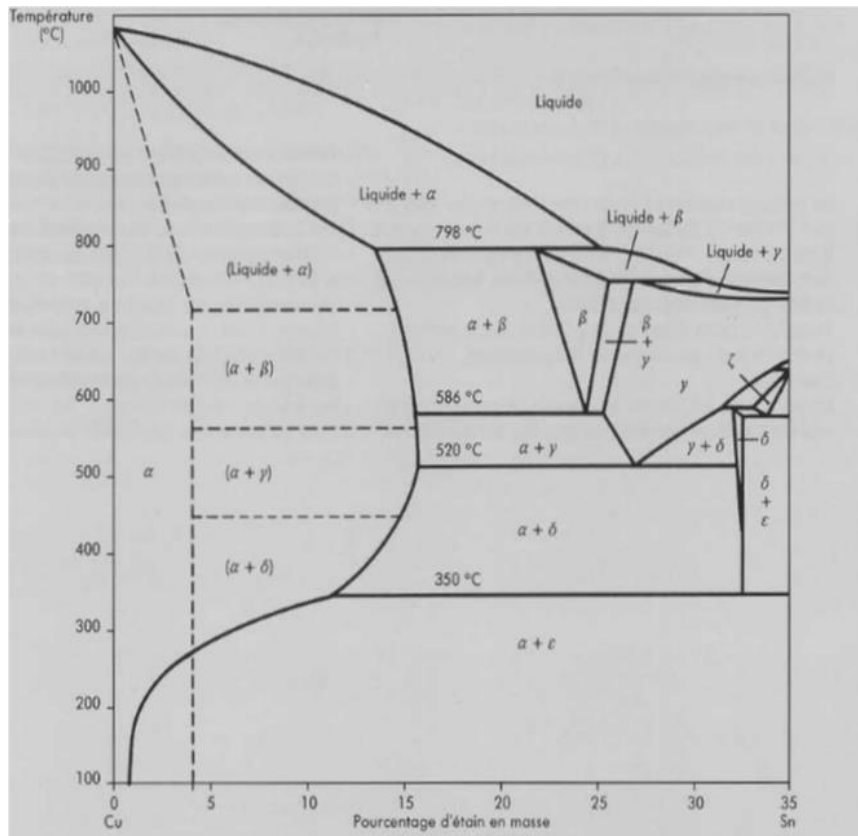


Figure II.2 : Diagramme d'équilibre des bronzes binaires.

Les principales caractéristiques de cet alliage sont indiquées par le tableau II.2.

Paramètres		Valeur	Unité
Dureté	HV	190	Vickers
Masse volumique	ρ	8.8	g/cm^3
Module de Young	E	100	GPa
Limite élastique	σ_y	490	MPa
Résistance mécanique à la rupture	R_m	570	MPa
Coefficient de Poisson	ν	0.31	--
Allongement	$A\%$	20	--

Tableau II.2 : Propriétés du bronze.

Avantages du bronze : Très bonnes caractéristiques de glissement, Bonnes caractéristiques mécaniques.

Applications : Industrie alimentaire Paliers, coussinets Glissières, pièces de guidage.

II.2.3. Acier XC42 :

L'acier est à la base un alliage entre le fer et le carbone dont la teneur, variable, est en masse inférieure à 1,7% (2%). Ensuite, on peut ajouter divers éléments d'addition (chrome, nickel,...) pour améliorer certaines caractéristiques (dureté, résistance à la corrosion,...) et constituer les familles d'aciers alliés (inoxydables...). Ils sont généralement caractérisés par une limite de rupture élevée, une bonne usinabilité et une bonne tenue aux chocs.

Les principales caractéristiques de l'acier sont indiquées par le tableau II.3.

Paramètres		Valeur	Unité
Module de Young	E	200	GPa
Limite d'élasticité	R_e	290	MPa
Résistance à la Rupture	R_m	414	MPa
Coefficient de Poisson	ν	0.31	--
Allongement	A (%)	23	--

Tableau II.3: Propriétés de l'acier XC42.

Chapitre III

Modélisation numérique et Résultats

III.1. Introduction :

De nos jours, la simulation informatique joue un rôle prépondérant dans la science et de l'ingénierie. En particulier, l'analyse numérique des composants est importante lors du développement de nouveaux produits ou de l'optimisation des conceptions.

L'objectif de ce travail étant de présenter une étude du comportement thermomécanique d'un système des matériaux en contact glissant, Le calcul numérique représentatif de la réalité peut être d'un grand intérêt économique puisqu'il peut informer sur les résultats de comportements avec la précision nécessaire ce qu'on peut avoir en réalité sous les mêmes conditions de charge et de fixation.

Dans ce contexte, nous avons réalisé une étude de simulation pour comparer le comportement tribologique de deux nuances d'alliage de cuivre, de dureté comparable, à savoir : le laiton (CuZn39Pb2) et le bronze (CuSn9p). Le but de ce travail est l'estimation de la température de contact du pion en faisant varier un nombre de paramètre à travers des modélisations par éléments finis par le logiciel Abaqus.

III.2. Introduction sur les éléments finis :

La méthode des éléments finis est une méthode de calcul numérique qui, ayant un profond caractère plus physique qu'abstrait, a été inventée plutôt par les ingénieurs que par les mathématiciens. Cette méthode a été appliquée pour la première fois dans des problèmes liés à l'analyse des contraintes et depuis, elle a été étendue dans d'autres problèmes liés au milieu continu.

La méthode des éléments finis (abrégée MEF) représente une modalité d'obtenir une solution numérique correspondant à un problème spécifique. Cette méthode n'offre pas une formule pour une certaine solution et ne résoudra pas une classe de problème. La MEF est une méthode approximative à moins qu'un certain problème pourrait être extrêmement simple conduisant ainsi à une formule exacte toujours valable.

III.3. Démarche éléments finis :

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème

- Assemblage des matrices élémentaires prise en compte des conditions aux limites
- Résolution du système d'équations

III.4. Présentation du logiciel :

III.4.1 Logiciels de calcul par éléments finis :

Les méthodes numériques sont généralement implémentées dans les codes développés par les chercheurs ou des codes commerciaux tels que (ABAQUS, ANSYS, ADINA) basés sur la méthode des éléments finis, FLAC en Méthode des différences finies et (UDEC, PFC) en Méthode des éléments discrets [10].

Le choix du code ABAQUS repose principalement sur deux raisons. D'une part, de nombreux travaux de modélisation numérique adaptés aux problèmes spécifiques des pions sous chargement latéral cyclique ont été réalisés avec succès en utilisant ce code, d'autre part, les diverses capacités de ce code correspondent bien à nos besoins, à savoir, ABAQUS permet de prendre en compte le contact en grands déplacements, la grande déformation des matériaux. Il ouvre notamment une porte aux utilisateurs en leur permettant de programmer des lois de comportement spécifiques des matériaux et des interfaces. Ce code est puissant et comporte des modules utiles, tel que le module en langage Python script (figure III-1), afin de faciliter une étude paramétrique sous ABAQUS. Tous ces points forts de ce code conduit à utiliser ABAQUS.

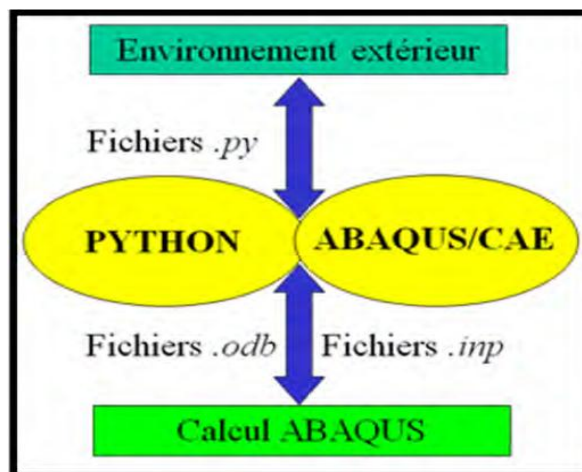


Figure III.1 : Schéma présent l'utilisation langage de script Python [11].

ABAQUS se compose de trois produits qui sont ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE, figure III.2.

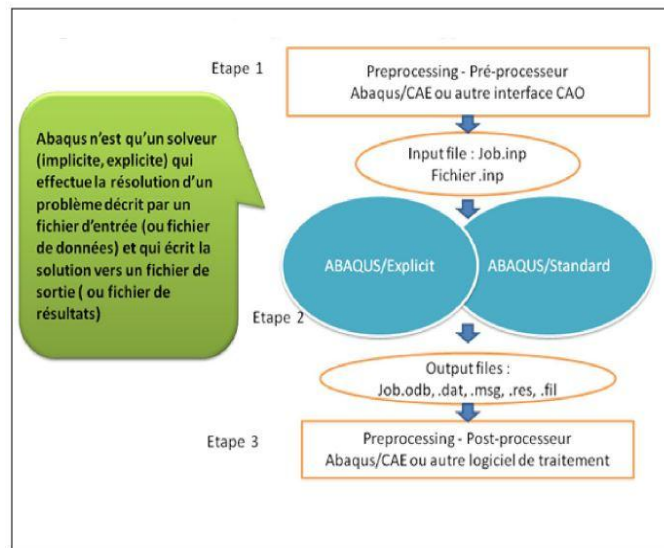


Figure III.2: Structure d'une analyse sous Abaqus [12]

III.4.2. Les éléments utilisés par ABAQUS :

On distingue différentes grandes classes d'éléments [13] :

- Les éléments unidimensionnels (1D) : barre, poutre rectiligne ou courbe.
- Les éléments bidimensionnels (2D) : élasticité plane (contrainte ou déformation plane), plaques en flexion, coques courbes de forme triangulaire ou rectangulaire.
- Les éléments tridimensionnels (3D) : de forme tétraédrique, hexaédrique...etc.
- Les éléments axisymétriques (pour les pièces présentant une symétrie de révolution au niveau de la géométrie et du chargement).
- Les autres éléments : ressorts, amortisseurs, rigides.

On peut résumer les différents éléments sur la figure suivante :

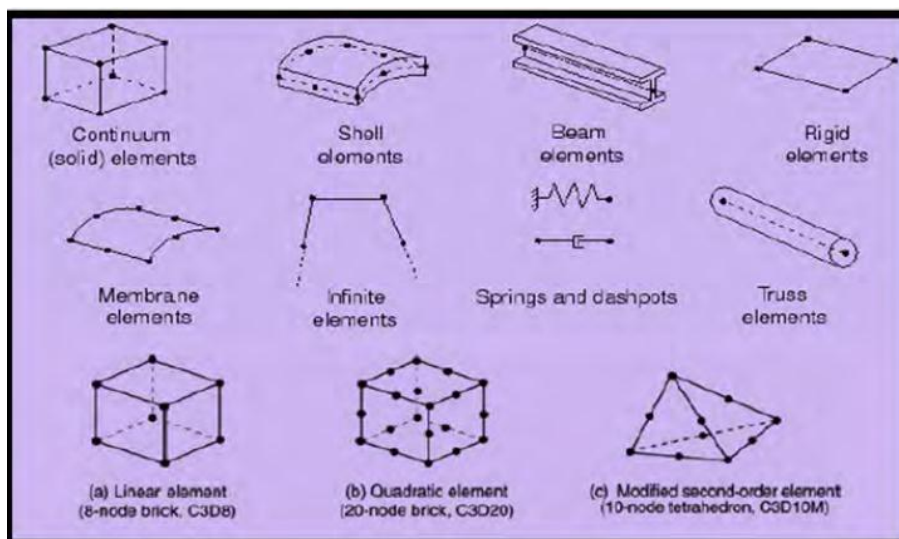


Figure III.3 : Quelques éléments parmi les plus utilisés (document Abaqus) [13].

III.5. Procédure de la modélisation :

Les différentes étapes de la modélisation sont décrites comme suit :

a. Module « Part »

On commence par créer trois « parts » (pion cylindre, pion cylindre avec chanfrein et bloc) en 3D. On crée les trois parts en 3D avec la caractéristique « déformable ».

- Les dimensions du bloc à glisser sont: 80x50x 15mm.
- Les dimensions du pion cylindre sont : 20mm diamètre x 20mm hauteur.
- Les dimensions du pion cylindre avec chanfrein sont : 20mm diamètre x 20 mm hauteur et chanfrein 45° x 2.5 mm.

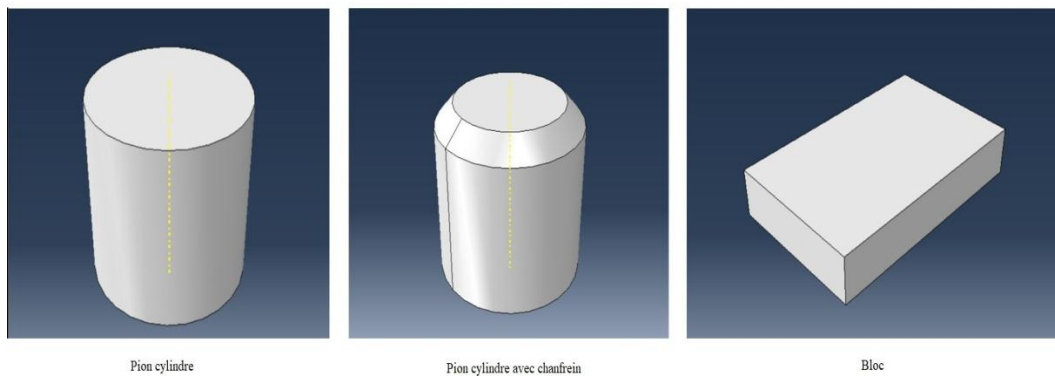


Figure III.4 : Création des pièces.

b. Module « Property »

Pour les pions, on définit le premier matériau qui est le laiton ($CuZn39Pb2$) et le deuxième qui est en bronze ($CuSn9P$). Le pion frotte sur un bloc rectangulaire en acier de type XC42.

Pour chaque matériau il faut renseigner la densité du matériau, son module de Young, le coefficient de poisson, la conductivité thermique et la capacité thermique massique comme l'indique la Figure III.5.

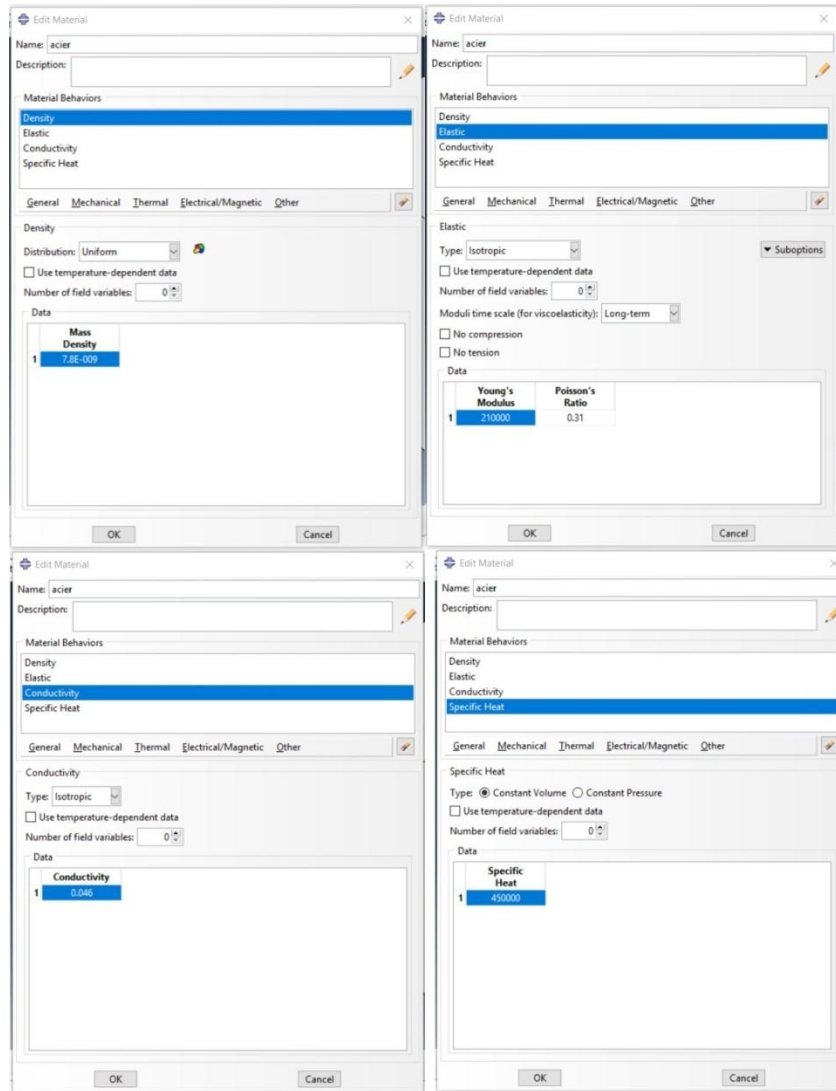


Figure III.5 : Propriété de l'acier.

c. Module « Assembly »

Dans ce module, on importe nos deux pièces et on positionne le pion par rapport au bloc (Figure III.6).

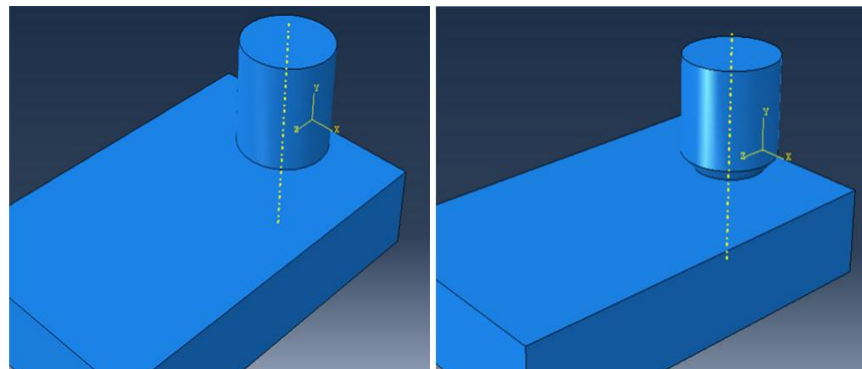


Figure III.6 : Assemblage des pions et bloc.

d. Module « Step »

Dans le module « step », nous créons une procédure **dynamic, temp-disp**, explicite. Il ne faut pas oublier d'activer la fonction dite « NLgeom » dans notre « step » pour avoir les effets non linéaires des larges déformations. Il est important pour cette simulation de bien définir le temps de calcul. Pour notre projet, nous avons spécifié un temps de simulation de 0.018 ms.

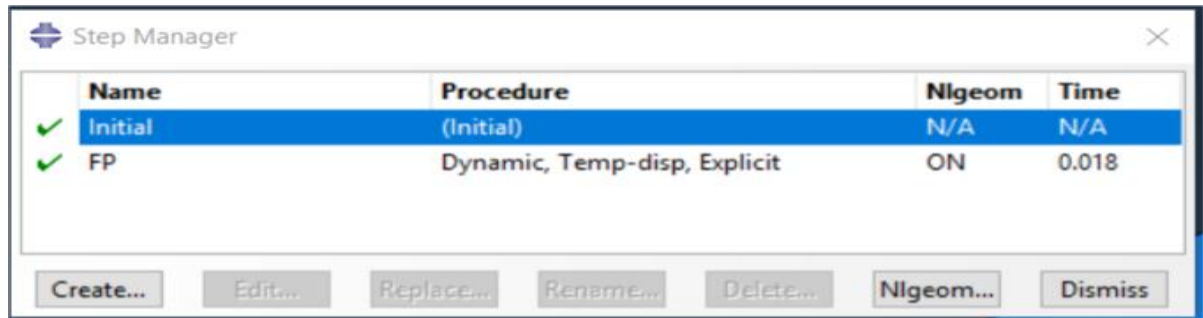


Figure III.7 : Création de step.

e. Module « Interaction »

Dans ce module nous allons définir le contact entre le pion et le bloc en créant une interaction de type **surface to surface contact** dans notre « step » avec un coefficient de frottement 0.3.

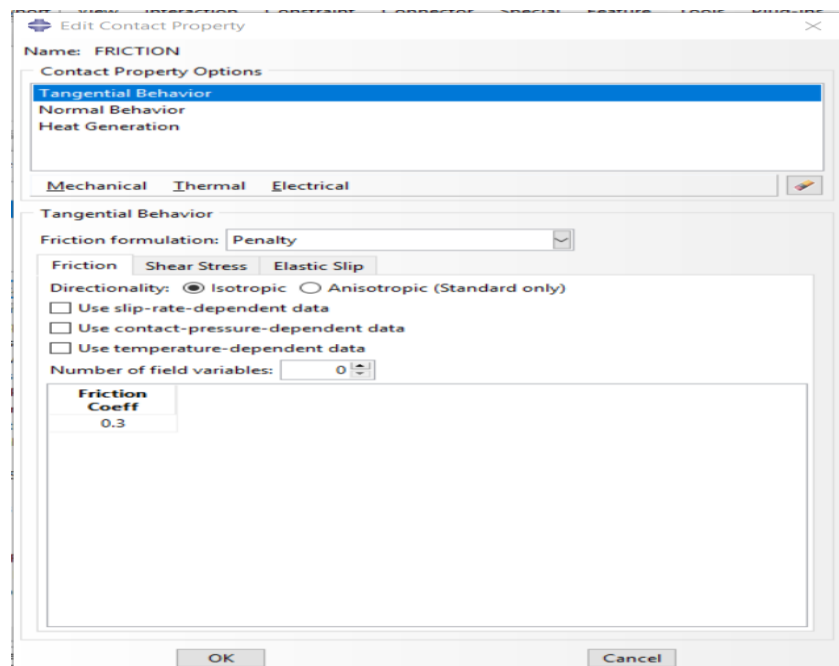


Figure III.8 : Module interaction.

f. Module « Load »

Tout d'abord nous appliquons une pression sur la surface par-dessus du pion. Pour notre projet nous avons choisi une pression de 10Mpa, une vitesse de glissement de 1m/s, et la température initiale 20°C.

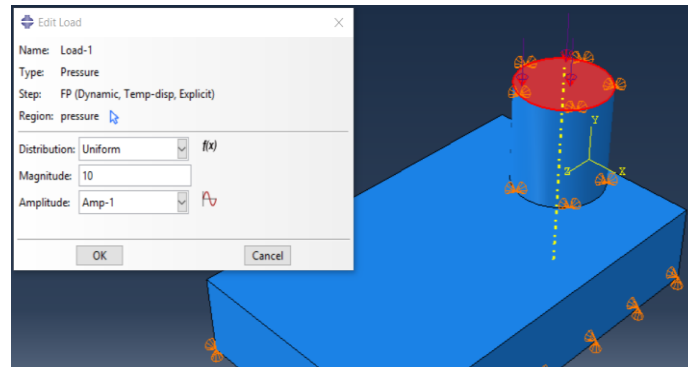


Figure III.9 : Création de la pression sur le pion.

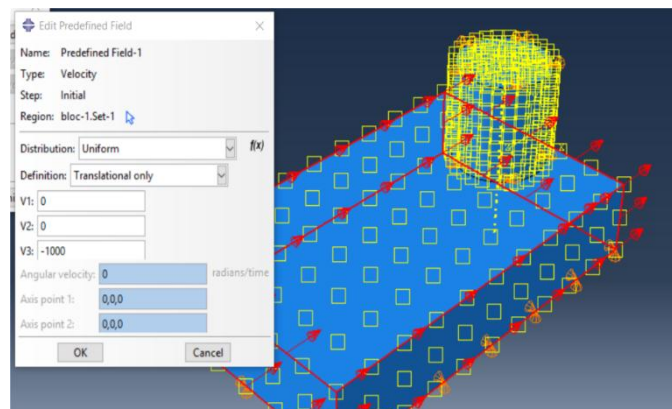


Figure III.10 : Création de la vitesse sur le bloc.

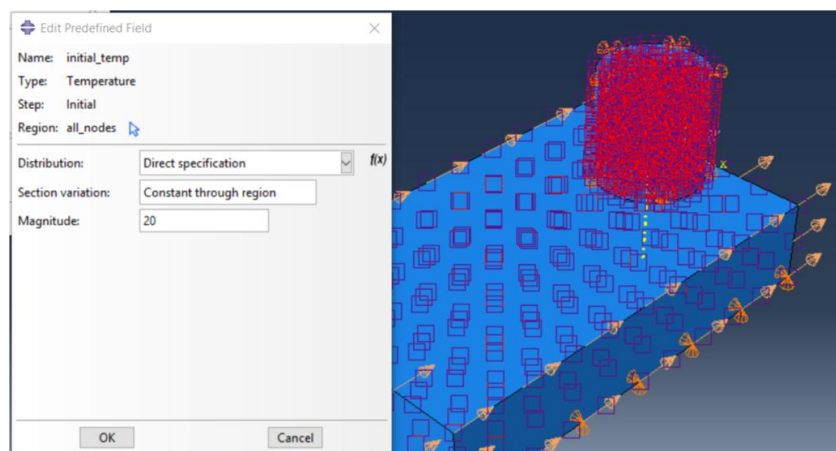


Figure III.11 : Insertion de la température initiale.

g. Module « Mesh »

Dans ce module nous avons réalisé le maillage du pion et du bloc. Pour cela, on a choisi les éléments du maillage de forme quadrilatère pour simplifier le calcul avec l'outil **mesh controls**. Un maillage fin au niveau du contact et progressif vers le milieu pour limiter le temps de calcul et avoir des résultats plus précis. Le nombre d'éléments des nœuds du bloc 231 éléments et le nombre des nœuds du cylindre 2775 éléments.

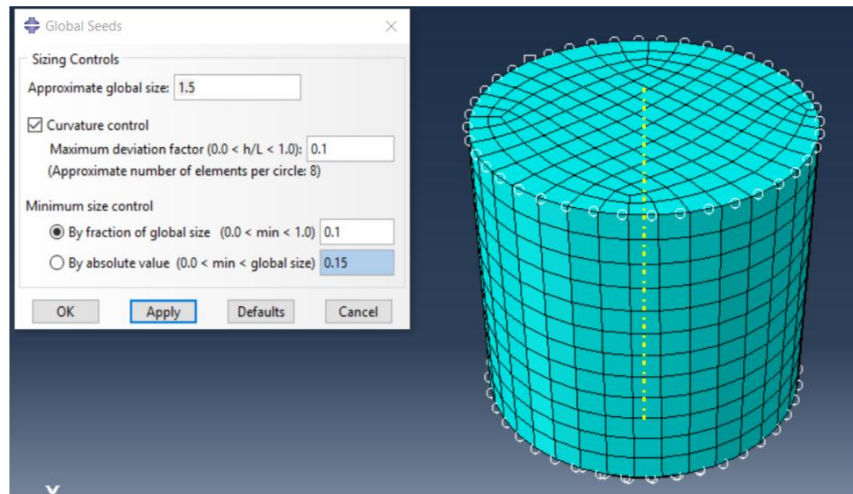


Figure III.12 : La taille des éléments de maillage.

h. Module « Job »

Dans le module « Job » on donne un nom pour notre fichier et on clique sur **submit** pour lancer les calculs.

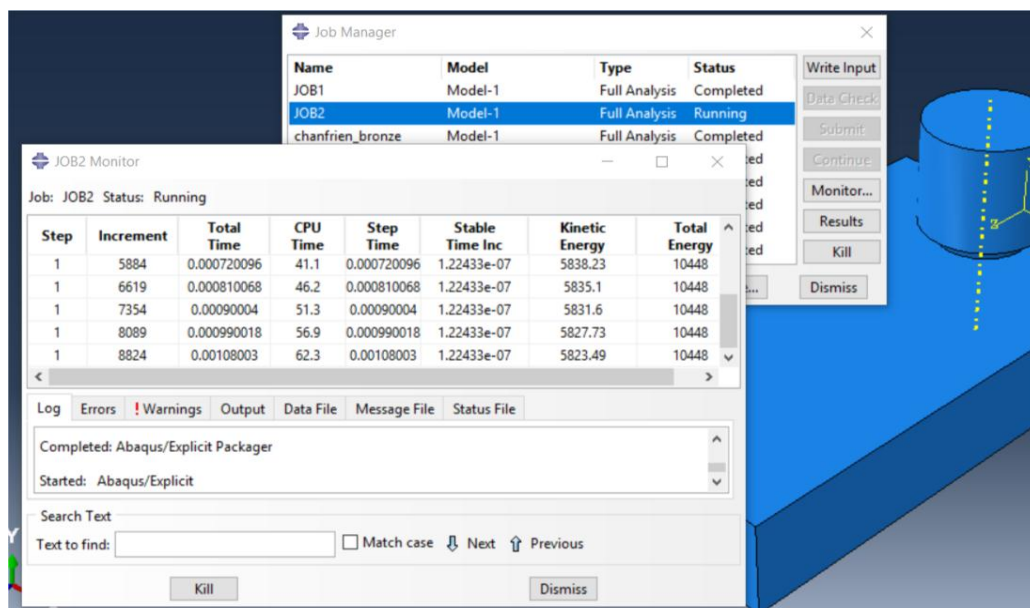


Figure III.13 : Lancement du calcul.

i. Module «visualization»

Ce module permet de voir la répartition des contraintes, des déformations, et de la température distribuée au niveau du pion et du bloc et même à différents plans de coupe.

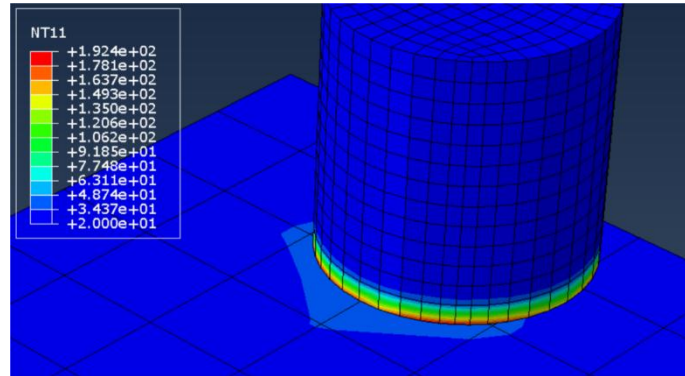


Figure III.14 : Distribution de la température.

La figure III.14 montre la répartition de la température au niveau du couple pion/bloc sous une pression de 10MPa et de vitesse 1m/s.

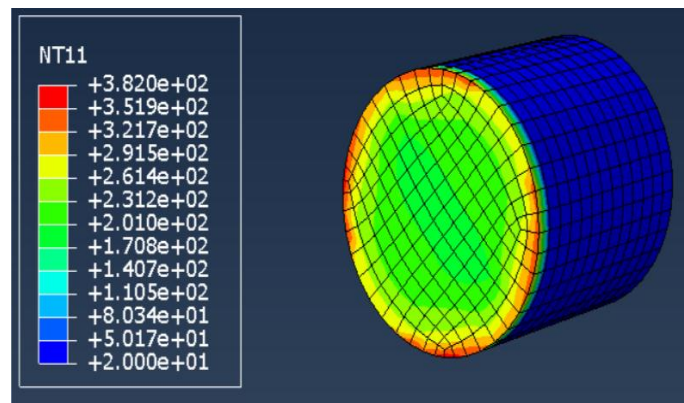


Figure III.15 : La température du laiton à une pression de 10 MPa et une vitesse de 2 m/s à l'instant (0.018s).

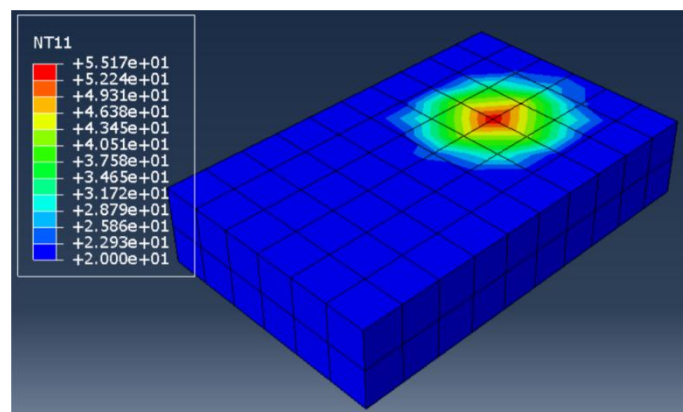


Figure III.16 : La température de surface du bloc à pression de 10 MPa, vitesse 2m/s à l'instant (0.018).

III.6. Les résultats de la simulation :

Nous présentons dans cette partie les résultats du comportement au frottement par glissement sec obtenus sur quatre couples (cylindre/bloc) et (cylindre avec chanfrein/bloc), pour les deux matériaux bronze et laiton.

L'objectif de cette étude est la mise en évidence de l'influence du matériau, de la vitesse de glissement et de la surface de contact sur les températures de contact qui présente un élément précieux pour l'étude du comportement tribologique des matériaux en contact glissant.

a. Influence de la surface de contact :

La figure III.17 présente la variation de la température maximale en fonction du temps de glissement, pour le laiton et le bronze.

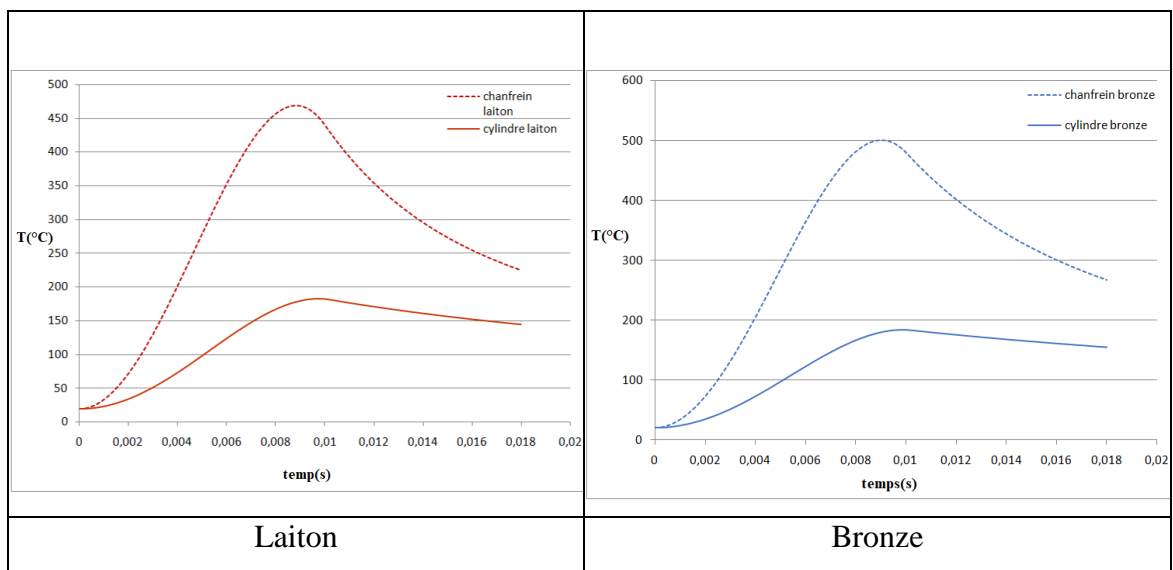


Figure III.17 : la variation de la température pour $V=1\text{m/s}$ et $P=10\text{MPa}$.

On remarque une très nette différence entre les évolutions de températures des pions cylindrique quand on a diminué la surface de contact par l'ajoute d'un chanfrein ou une élévation de températures est enregistrée pour les deux matériaux. La température du contact est passée de 200°C jusqu'à environ 500°C. Cette augmentation de température est probablement due à la concentration de chaleur aux points de contact pour la surface

la plus petite. Après un certain temps de glissement les températures des deux contacts (avec et sans chanfrein) se rapprochent est cela est certainement due à l'évolution de la surface de contact avec le temps. Cependant, ce résultat se justifie par le fait que la production de chaleur dans un contact frottant est attribuée au cisaillement rapide des extrémités des aspérités (jonctions) de l'aire réelle de contact. Il s'agit donc d'événements locaux et brefs à l'origine de la notion de température éclair ou « flash temperature » [14],

En plus la chaleur ne se dissipe que difficilement. Pour les contacts plan la chaleur se transmet par conduction sur l'aire géométrique de contact dont la température est alors désignée par température (moyenne) de contact.

b. Influence de la vitesse de glissement :

La figure III.18 représente la variation de la température maximale du laiton et du bronze entre cylindre et cylindre avec chanfrein en fonction la vitesse (1 à 5m/s) à la pression de 10MPa et un temps de glissement de 0.018.

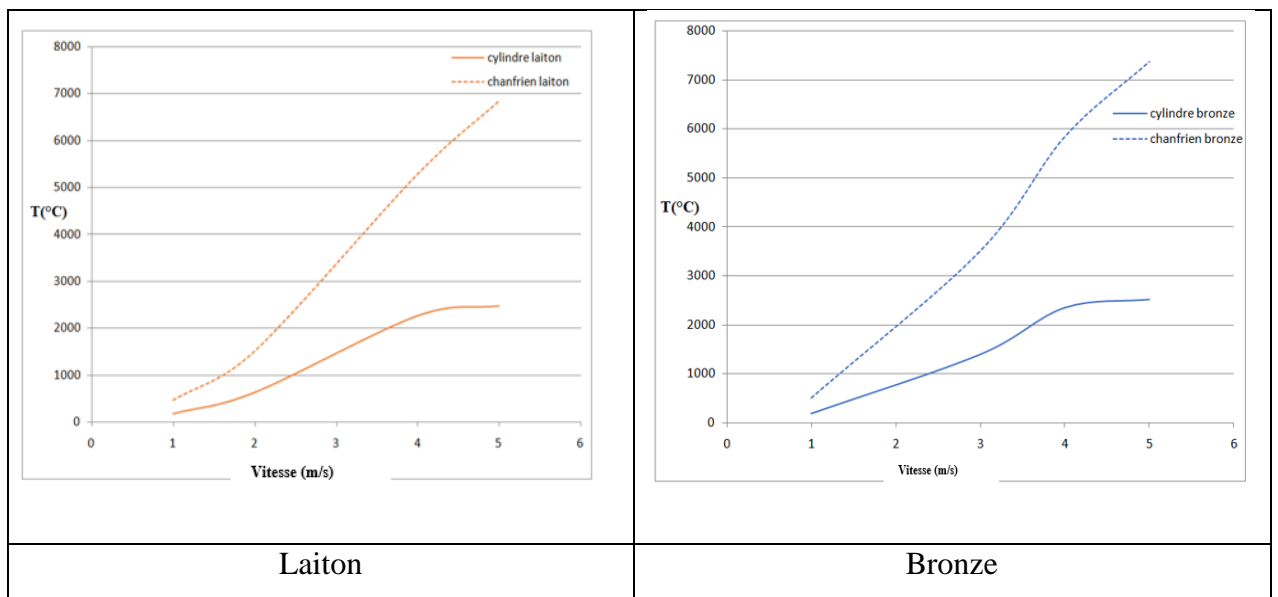


Figure III.18 : la variation de la température en fonction de la vitesse à P=10MPa.

On remarque sur la figure III.18 que La vitesse de glissement et la température ont une variation proportionnelle. Cela peut être expliqué par le fait que le frottement entre deux

surfaces conduit à la transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique. Durant la phase initiale, la température augmente; elle atteint ensuite un état stationnaire lorsque la chaleur produite équivaut à la chaleur dissipée par conduction. Ce résultat est en bon accord avec la théorie, comme le montre le modèle théorique de la quantité d'énergie thermique, Q_f (J/m^2s) (eq.I.5 chapitre 1), produite lors du glissement d'un matériau sur la surface d'un autre qui est proportionnelle à la force de frottement F ainsi qu'à la vitesse de déplacement v .

c. Influence des effets thermiques en volume

Afin de voir le comportement thermique du pion en volume, on a tracé l'évolution des températures à l'intérieur de ce dernier.

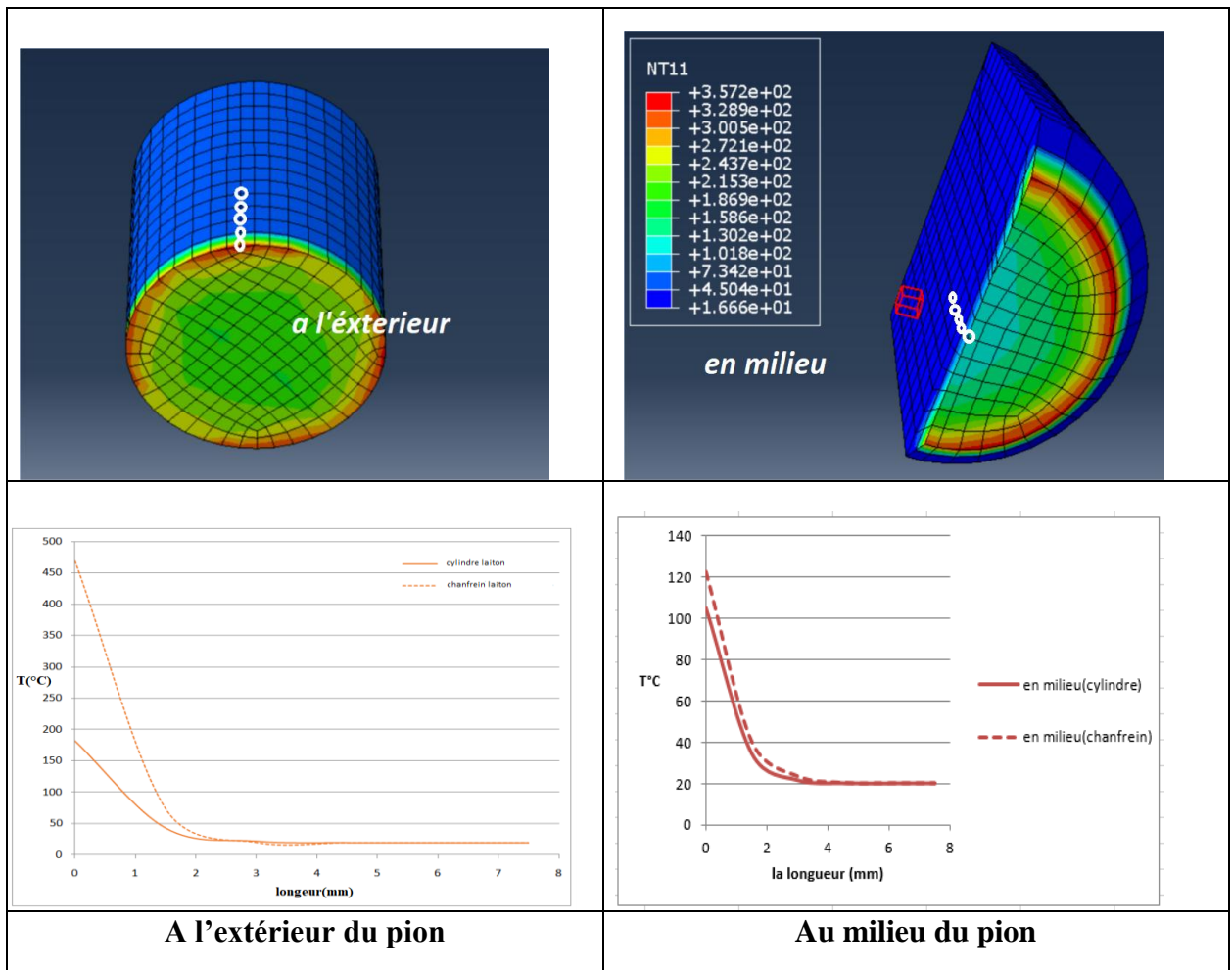


Figure III.19: Variation de la température du laiton en fonction de Longueur en volume.

La figure III.19 représente la variation de la température maximale pour les deux configurations du pion, en fonction de la variation de la longueur (0 à 7.5mm) à une vitesse de 1m/s et une pression de 10MPa.

On remarque que la température à la surface de contact est élevée puis elle diminue en progressant en volume du matériau jusqu'à ce qu'elle atteigne la température initiale (20°C) à environ 2mm et se stabilise.

Les températures enregistrées à l'extérieur, pour le pion avec un chanfrein sont supérieures à celles du pion cylindrique. Par contre au milieu du matériau, les deux configurations du pion présentent des températures proches ce qui confirme l'effet de la forme de la surface de contact sur le comportement tribologique d'un système mécanique.

Conclusion générale

A ce jour, l'homme a connu plusieurs problèmes dans l'industrie, parmi eux le frottement, la température et l'usure. Ces derniers, influent sur la durée de vie des matériaux en contact et accélèrent leurs dégradations.

L'objectif principal de cette étude est de voir l'influence de la surface de contact et la vitesse de glissement sur le comportement thermique qui se résulte à l'interface d'un tribosystème en mouvement relatif par glissement sec.

Les observations et les analyses des résultats obtenus montrent que la forme géométrique des pions a fortement influencé la température de surface générée lors du frottement et une élévation de température est enregistrée pour les deux matériaux d'étude pour la petite surface.

En ce qui concerne la vitesse de glissement, on a remarqué une variation proportionnelle avec la température jusqu'à une certaine valeur qui correspond à la température moyenne de la surface.

L'analyse des pions en volume montre bien que les effets thermiques sont localisés à la surface de contact, et à peine à quelque millimètre de cette dernière, le corps du pion retrouve la température initiale.

Cette étude nous a aidé à définir quelques facteurs qui ont une influence importante sur le comportement thermique et mécanique des couples tribologiques.

Références bibliographiques

- [1] ABDELHAMID Mohamed, « influence de la microgéométrie dans un contact de pièces mécaniques rugueuses », mémoire de master en électromécanique, Institut Maintenance Et Sécurité Industrielle.
- [2] S. Senhadji : ‘Etude expérimentale du comportement au frottement et à l’usure en contact plan du laiton et du bronze en milieu lubrifié’ .Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 2018.
- [3] M. Delqué, “Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de depots composites projetes plasma”, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2007.
- [4] T. Da Silva Botelho, “Contribution à l’étude du comportement élastoplastique de surfaces métalliques rugueuses revêtues d’un métal de faible dureté”, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2004.
- [5] ‘Etude expérimentale des paramètres thermiques et mécanique du cuivre, laiton et bronze en contact dynamique sec avec l’acier’, Mémoire de master en génie mécanique.
- [6] Claudiu Constantin Ionescu (2013).caractérisation des mécanismes d’usure par tribo-corrosion d’alliages modèles Ni-Cr. Ecole Centrale Paris.
- [7] F. P.Bowden, D.Tabor, Friction and Lubrification of Solids, Part II. Oxford: Clarendon press, 1964, 544 p.
- [8] Notions de tribologie, lien : http://58consmecha.free.fr/Cours%20a%20Pdf/contact_tribologie.pdf.
- [9] M. Amiri et M. Khonsari, “On the thermodynamics of friction and wear”, Entropy, Vol. 12, No. 5, pp. 1021–1049, 2010.
- [10] P. He (2006), « modélisation numérique du comportement mécanique sur pente des dispositifs géosynthétiques » Thèse de doctorat, l’université Bordeaux 1.
- [11] M. Abbas, (2012) Introduction au logiciel ABAQUS
- [12] MEFTEH KAMEL. Cours : Introduction général au logiciel Abaqus université de Biskra. 2013.
- [13] M. Sartor « Eléments finis » Notes de cours –Chapitre 1

[14] J.Denape, N. Laraqi « Aspect thermique du frottement: mise en évidence expérimentale et éléments de modélisation » Mec. Ind. (2000) 1, 563–579.