

II-2-4 Exemple de calcul du taux d'usure d'une piste usée sectionnée en quatre tronçons :

Un exemple pour calculer le volume usé moyen d'une piste usée avec les paramètres suivantes :

Tableau.(II-2.3) : Les données introduites dans un code de calcul par Excel pour calculer le volume usé

Profondeur initiale (Référence)		Bornes inf et sup des profondeurs usés de chaque profils		Informations sur les paramètres pin-on-disc	
		Inf	Sup	Bille	Al ₂ O ₃
Profil (a)	00	936	1356	Diamètre [mm]	6
				Temp [°C]	650
Profil (b)	00	977	1377	Rayon traj [mm]	6
				Vitesse [cm/s]	50
Profil (c)	00	611	1223	Charge [N]	20
				Distance [m]	5000
Profil (d)	00	580	921		

- Les résultats affichés par le code de calcul Excel :

Tableau.(II-2.4) : Résultats moyens de calcul le volume usé, coefficients d'usure et écart-type

Résultats du volume moyen usé				
Les 4 Profiles de la piste	Aire totale usé de chaque profil [μm^2]	Volume usé [μm^3]	Coefficient d'usure [$\mu\text{m}^2\text{tr}^{-1}$]	
a)	1029.7	38819.5	0.103	
b)	207.8	7834.9	0.021	
c)	1265.5	47708.2	0.127	
d)	654.7	24680.7	0.065	Ecart-type
Moyenne	789.4	29760.8	0.079	0.046

- La valeur (**789.4 μm^2**) indique l'aire moyenne des 4 tronçons de la piste sectionné **Figure.(II-2.6)**, chaque aire déterminé par une fonction intégrale limité par les bornes inf et sup dans une page Excel **Tableau.(II-2.3)**.
- La valeur (**29760.8 μm^3**) le volume moyen d'une piste usée, obtenu en multipliant (**789.4 x Périmètre de la piste usé**).
- La valeur (**0.079**) coefficient d'usure moyen des 4 profils.
- **Ecart type(0.046) obtenu** (coefficient d'usure max - coefficient d'usure moyen).

II-2-5 **Conclusion :**

Au terme de ce chapitre nous pouvons dégager quelques remarques, quant à la préparation des échantillons (cermets) à partir de la poudre jusqu'à la caractérisation. Tout d'abord l'élaboration des cermets par la métallurgie des poudres et leur frittage est très délicate, le nombre de paramètre à considérer pour répondre à des propriétés thermomécaniques du cermet qui sont:

- Caractéristiques des grains de la poudre (humidité,...) et géométrie.
- Broyage pour une bonne homogénéité (temps, vitesse du broyeur).
- Compactage (densité) et valeurs de pressage.
- Processus de frittage (température, temps d'échauffement et refroidissement).

La caractérisation de nos échantillons (cermets) montre qu'ils répondent aux norme (SI), concernant la duretés, micro dureté, et densité des différents nuances. L'analyse de la micro structure des nuances indique une homogénéité acceptable, donc ce type d'échantillons sont capables d'être utilisés pour des tests de frottements et qui donnent des résultats scientifiques
suivante :

- Les caractéristiques du tribomètre à haute température répondent à nos objectifs scientifiques est être utilisé dans notre étude et pourrait assurer des résultats scientifiques de qualités.
- Une séries des tests de frottement a permis de tester différentes nuances, en appliquant des paramètres thermomécaniques sévères.
- Originalité de la démarche des tests de frottement le temps de contact ou cycle des tests (5000 m) et la température.
- Une analyse des pistes usées a permis d'apprécier les volumes usés.

Chapitre III :
**Méthodologie d'analyse et simulation
numérique de l'usure**

III-1 Algorithme de simulation de l'usure par un code basé sur la méthode des éléments finis :

III-1-1 Introduction

III-1-2 Étapes d'analyse de l'usure par la méthode des éléments finis

III-1-3 Les étapes principales pour une simulation numérique de deux solides en contacts

III-1-4 Organigramme de la méthode de simulation numérique de l'usure par un code

III-2 Modèle d'Archard modifié utilisé pour la simulation de l'usure dans des conditions thermomécaniques :

III-2-1 Modèle d'Archard modifié utilisé par le code de simulation de l'usure

III-2-2 Procédure de calcul du volume d'usure par simulation numérique

III-2-3 Procédure de mise à jour de la géométrie

III-2-4 Les commandes de l'usure utilisée par le code

III-2-5 Exemple d'un fichier de données utilisé par un code de simulation de l'usure et affichage des résultats

III-2-6 Conclusion

III-1 Algorithme de simulation de l'usure par un code basé sur la méthode des éléments finis

III-1-1 Introduction :

Ce chapitre présente un algorithme de simulation de l'usure par un code basé sur la méthode des éléments finis d'un comportement thermomécanique pour un contact géométrique. Cette simulation de l'usure qui est influencée par les interactions entre les paramètres de fonctionnement (chargement, vitesse de glissement, température de contact) et les propriétés de surface. Les contacts roulants ou glissants sont particulièrement exposés à la fatigue de surface et aux dommages structurels qui en résultent, plusieurs variables peuvent être utilisées pour décrire ce dommage (fatigue thermomécanique). L'objectif de ce chapitre est de présenter un modèle pour une simulation de l'usure par un code basé sur la méthode des éléments finis. Le modèle de contact est nécessaire pour déterminer le champs des contraintes de contact des deux surfaces, suivi par une analyse des points de contact déplacés de la surface la moins dure. Enfin, une analyse des résultats obtenus exprimée en volume ou en hauteur d'usure.

Ce chapitre consiste à aborder les étapes suivantes :

- Une analyse de l'usure par la méthode des éléments finis.
- Présentation des étapes de simulation d'un contact de deux matériaux.
- Un calcul de la pression de contact puis en injectant un modèle d'itération avec les paramètres d'entrées (sous programme).
- Un affichage des résultats.

III-1-2 Etapes d'analyse de l'usure par la méthode des éléments finis :

L'analyse de l'usure par la méthode des éléments finis d'une surface consiste à calculer les pressions aux nœuds de la surface soumis à l'usure. Après un cycle de fonctionnement (contact relative des deux surfaces), un déplacement des nœuds se produit indique de la matière enlevé (usure). Un modèle (soubroutine) injecté dans un code de calcul (Ansys) permis de calculer le volume usé. Ces étapes de cette analyse plus en détail sont présenté de la manière suivante :

- Chaque nœud est déplacé (sous la pression et le frottement de la surface en mouvement relative) , incité à l'enlèvement de matière localisée (au niveau du nœud).
- Après un cycle de fonctionnement, le déplacement des nœuds au niveau du contact se rapproche (superposition de deux nœuds), une géométrie révisée du contact indique un point de surface usée.
- Un modèle (Archard modifié) permettant de calculer le volume usé, est injecté dans un code de calcul (Ansys).
- La géométrie du modèle est mise à jour à chaque cycle.

III-1-3 Les étapes principales pour une simulation numérique de l'usure de deux surfaces en contact:

Les étapes principales pour une simulation numérique de l'usure d'une surface sont :

- **Géométrie de contact et type du solide :**
 - La géométrie de contact spécifier le (type de contact des deux surfaces, plans, ponctuel,...).
 - Modèle de contact de deux surfaces (modèle 2D).
 - Type de solide (rigide déformable pour le matériau étudié pour le cas usure).
 - Comportement du matériau (élasto-plastique).

Fig.(III-1-1).

- **Propriétés de matériaux en contact :**

Spécifier au code de calcul les propriétés suivantes :

Module de Young (E), coefficient de poisson (ϵ), conductivité thermique (γ) , coefficient de frottement (μ).

- **Maillage :**

Le maillage est un choix très important pour une simulation numérique de l'usure, il est basé sur plusieurs paramètres :

- La géométrie de maillage (maillage de nœud triangulaire, maillage de nœud rectangulaire,...),
- La géométrie de maillage, responsable à la convergence et divergence des résultats (volume usé).
- La zone de contact des deux matériaux qui provoque l'usure, nécessite un raffinement du maillage **Fig.(III-1-2)** [110]. Ce raffinement du maillage augmente le nombre de nœuds, ce qui demande un temps de calcul plus important, et une utilisation d'un ordinateur de bon performance .

- **Les conditions aux limites et initiales :**

La simulation exige de limiter les grandeurs géométriques des deux matériaux (surface de contact, limiter la zone de glissement), le temps de contact (nombre de cycles), les grandeurs thermomécaniques (pression, température..).

- **Les conditions de fonctionnement :**

Le code de simulation utilisé (Wear Model Ansys), pour le cas d'un contact glissant nécessite l'introduction des paramètres de fonctionnements (charge, vitesse de glissement, température de contact..), cycle (temps de contact).

- **Solution et analyse des résultats :**

Après toutes ces étapes, notre logiciel (code de simulation Wear Modèle Ansys) affiche des résultats numériques qui répondent à notre modèle injecté (modèle Archard). L'analyse des résultats de simulation numérique est l'étape la plus importante (out put results), et surtout pour le cas de l'usure (qui prend en considération plusieurs paramètres et qui demande un processus particulier pour estimer le volume usé comme résultat) **Fig.(III-1-3)**.

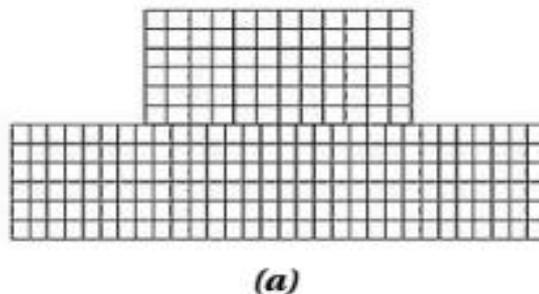


Figure.(III-1-1): Modèle de contact et maillage de la géométrie

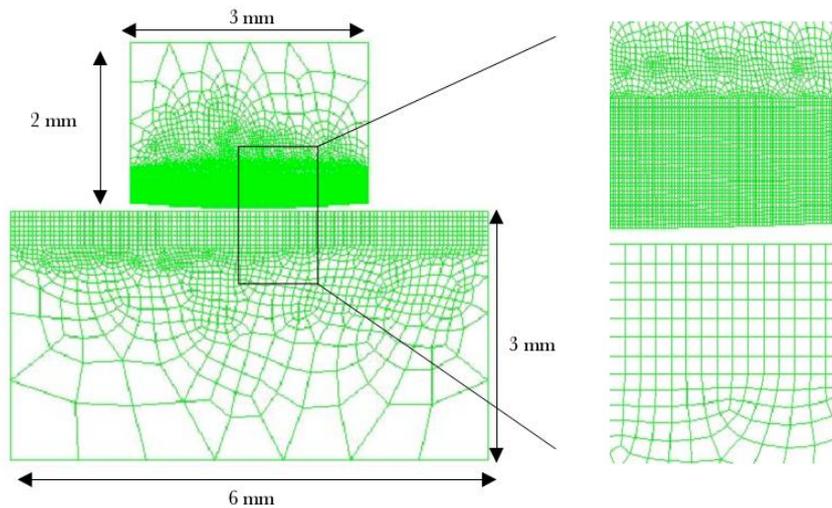


Figure.(III-1-2): Maillage rectangulaire raffiné au niveau de la zone de contact usée.[110]

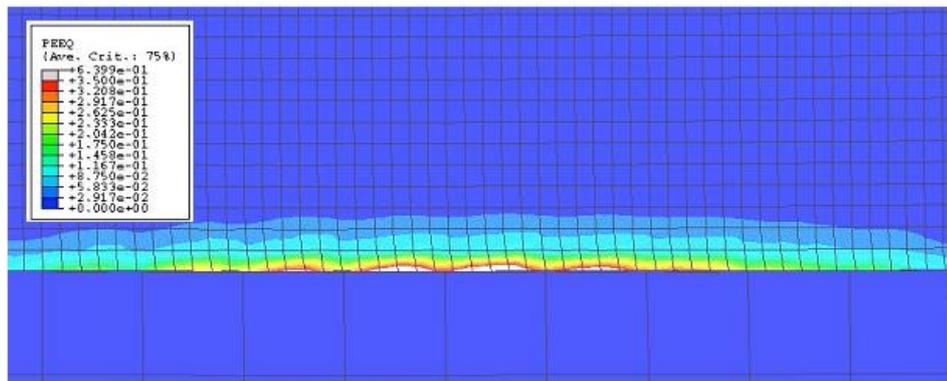


Figure.(III-1-3): Résultats d'une surface usée (déformation plastique) pour une géométrie de contact de 6 mm après un cycle pour des paramètres ($T=650^{\circ}\text{C}$, $F=20\text{N}$, $V=0.5\text{m/s}$)

III-1-4 Organigramme de la méthode de simulation numérique de l'usure par un code:

L'organigramme comporte les étapes utilisés par le code de calcul **Fig.(III-3-4)** :

- Les paramètres d'entrée.
- Modèle de contact maillé par éléments finis (EF).
- Calcul de la pression de contact par (EF).
- Un modèle d'Archard permet de calculer le volume usé.
- Un test de mise à jours les nœuds déplacés (ΔN) par rapport au cycle total d'usure (N_t).
- Affichage des résultats (volume usé), pour un cycle total (N_t).

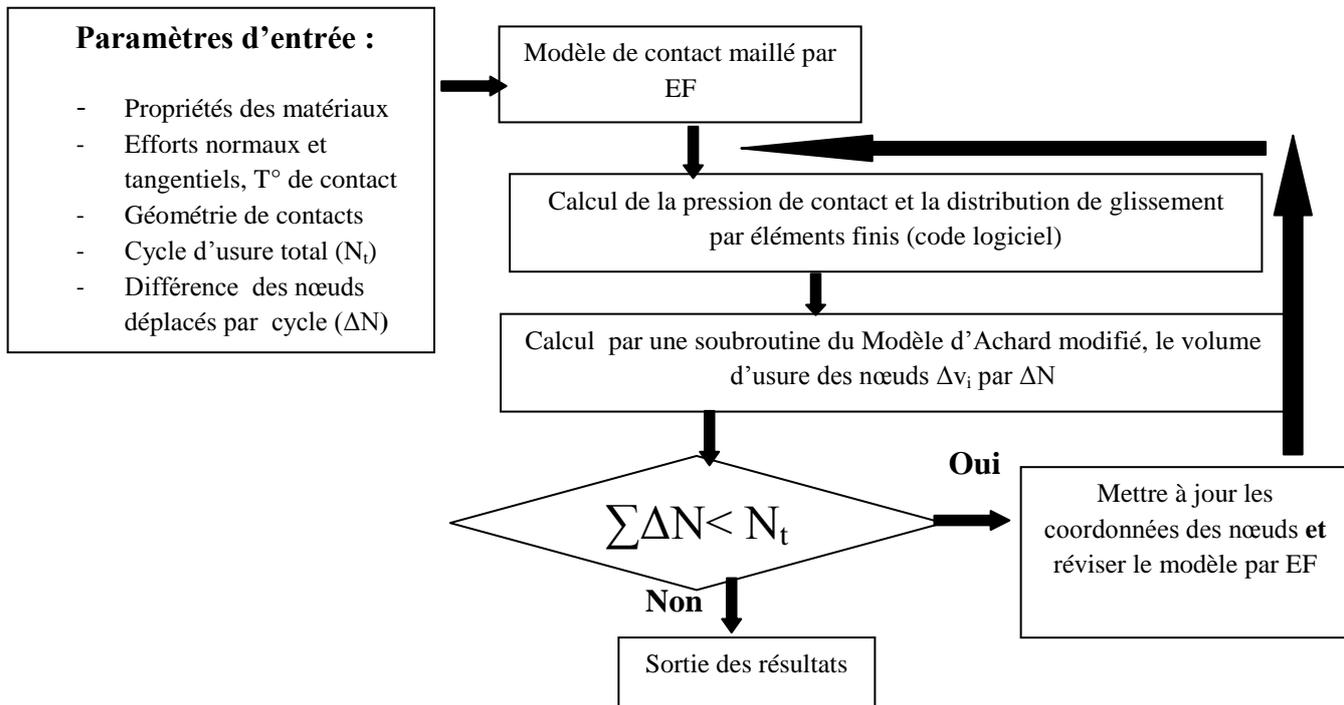


Figure.(III-1-4):Organigramme de la méthode de simulation numérique de l'usure par un code

✓ **Code de calcul multi-physique pour analyse l'usure (Ansys):**

Un code de calcul multi-physique pour une simulation numérique, d'un cas de structure dans les domaines (mécaniques, thermiques, chimiques, etc), passe par les étapes suivantes:

- Spécifier le type de la solution pour notre cas (usure).
- Appel de l'interface du code de l'usure afin d'entrer (les conditions aux limites et initiales, propriétés mécaniques et thermiques, nombre de cycles, temps de contact).
- Créer la géométrie du modèle et de maillage.
- Identifier les paires de contacts.
- contact désigné et les surfaces cibles.
- Définir la surface cible (zone de contact).
- Déterminations des constantes réelles (module de Young, coefficient de Poisson.....).
- Définir (paramètres de fonctionnements) et type de solide (contact rigide et flexible uniquement).
- Appliquer des conditions aux limites nécessaires.

- Résoudre le problème de contact.
- Examiner les résultats.

III-2 Modèle d'Archard modifié utilisé par la simulation de l'usure dans les conditions thermomécaniques:

III-2-1 Modèle d'Archard modifié utilisé par le code de simulation de l'usure :

La simulation numérique par la méthode des éléments finis de l'usure superficielle d'un matériau en contact par glissement relatif sous haute sollicitation thermomécanique a pour but de calculer le volume d'usure. Un modèle d'Archard (III-2-1) modifié et injecté dans le code permet de calculer le volume d'usure en fonction des paramètres thermomécaniques (température de surface, pression de contact et de la vitesse de glissement). Ce modèle d'Archard modifié prend en considération l'influence de la température de surface du matériaux et qui agit sur la dureté $H(T)$ et le coefficient d'usure $K(T)$ [102].

$V = \frac{K(T)}{H(T)} \int V_g \cdot S \cdot \sigma \cdot dt$	(III-2-1)
--	------------------

Avec :

V : Volume d'usure (mm³).

t : Temps de contact (Heurs).

K : Coefficient d'usure en fonction de la température T.

H : Coefficient de dureté (Vickers, Rock-well) en fonction de la température T.

V_g : Vitesse de glissement entre les deux matériaux (m/s).

S : Surface de contact (mm²).

σ : Contrainte appliquée sur la surface(N/mm²).

K(T) : Coefficient d'usure du matériaux sa valeur est déterminer en fonction de la température

H_v(T) : Dureté du matériau de Vickers du matériau le moins dur soumis à l'usure (N/mm²)

$f(T) = \frac{K}{H}$	(III-2-2)
----------------------	------------------

$K(T) = -1.6025 \cdot 10^{-4}T + 1.74643 \cdot 10^{-7}$	(III-2-3)
$H(T) = 3659T - 2.9452$	(III-2-4)

La fonction **(III-2-2)** est déterminée en fonction de la température de contact, nécessite la détermination du coefficient d'usure (K) et dureté du matériau le moins dur (H_V) pour la même température.

Le tableau **Tab.(III-2-1)** montre la dureté en pourcentage de notre matériau référence (WC- Co) en fonction de la température surfacique. Nous constatons dans le tableau que la dureté en décroissance en pourcentage inversement avec de la température :

Tableau.(III-2-1): Dureté en pourcentage du matériau WC-Co en fonction de la température

Température C°	Dureté H_V en %(WC-Co)
20	100%
100	90%
200	85%
400	70%
800	50%

III-2-2 Procédure de calcul du volume d'usure par simulation numérique:

✓ **Procédure itérative du modèle :**

La procédure de l'itération la plus largement utilisée pour simuler l'usure se produisant à une interface de contact est une procédure itérative décrite par l'intégration numérique du modèle pour calculer le volume usé **(III-2-1)**. Le mode opératoire d'itération pour prédire l'usure d'un contact de deux matériaux frottant incorpore les étapes précitées. Comme on a mentionné plus haut, l'ensemble des deux surface en contact sera utilisé pour illustrer la procédure de simulation. La simulation de l'usure à l'interface du contact est réalisée en tenant compte de chaque cycle séparément. L'usure dans un cycle quelconque peut être obtenu par discrétisation du cycle en un certain nombre d'étapes et l'application par **(III-2-5)** . A chaque étape, une analyse par éléments finis est exécutée pour déterminer la pression de contact.

Le volume d'usure pendant un cycle en tout point de la surface de contact peut alors être déterminée par l'équation **(III-2-6)**, qui est une modification de **(III-2-5)**.

$V_{i,j} = V_{i-1,j-1} + \frac{K(T)}{H(T)} \cdot v_g \cdot \Delta s_{i,j} \cdot \sigma_{i,j}$	(III-2-5)
---	------------------

$V_{i,j}$: volume d'usure à (i,j) itération

$V_{i-1,j-1}$: volume d'usure de l'itération précédente.

La variation de la surface de contact après un certain nombre itérations (n itération) comme cela est exprimé dans l'équation(III-2-6) .est déterminée en fonction de la vitesse de glissement, dureté du matériau, coefficient d'usure du matériau et la température de contact.

$V_{n,i,j} = V_{n,i-1,j-1} + \frac{K(T)}{H(T)} \cdot v_g \cdot \Delta s_{i,j} \cdot \sigma_{n,i,j}$	(III-2-6)
---	------------------

n : Désigne le nombre de nœuds à la surface de contact (du modèle d'éléments finis) qui peut ou qui ne peut pas établir un contact avec la surface opposée.

i et j : Indices indiquent l'étape en cours et le cycle, respectivement.

Tous les autres termes sont tels que définis précédemment, La géométrie est alors mis à jour pour refléter le degré d'usure et de préparer le modèle pour la prochaine étape. Les détails de la procédure de mise à jour de la géométrie seront discuté au paragraphe suivant. Les procédés décrits ci-dessus sont répétées jusqu'à ce que toutes les étapes d'un cycle sont terminées. Le terme mise à jour de l'étape est adopté pour cette procédure car la géométrie est mis à jour après chaque étape. Le processus de simulation pour la procédure de mise à jour de l'étape est résumé dans l'organigramme **Fig.(III-1-4)**.

III-2-3 Procédure de mise à jour de la géométrie:

Le processus de mise à jour de la géométrie est nécessaire afin de simuler correctement et prédire l'usure, se produisant à l'interface de contact. En effet, l'enlèvement de matière modifie la surface de contact et provoque une redistribution de la pression de contact résultant du contact. Ces modifications ne peuvent être capturées si la surface est modifiée par le biais d'une mise à jour de la géométrie. L'estimation de l'usure grâce à une extrapolation fondée sur la surface d'origine a été montré pour produire des prédictions. Il est donc de plus

en plus en tant que norme, comme on le voit dans la littérature que les mises à jour de la géométrie sont inclus dans le processus de simulation de l'usure. La procédure proposée pour mettre à jour la géométrie dans cette recherche comporte deux étapes.

- Déterminer la direction normale (vecteur) de la surface de contact à l'emplacement de chaque nœud de surface (nœud de contact).
- Déplacer la position des nœuds de surface dans la direction du vecteur normal d'un montant égal à l'incrément d'usure.

La direction normale des nœuds de surface à l'emplacement des nœuds de contact peut être obtenu en tenant compte des emplacements des éléments de contact. Les éléments de contact à la surface ont trois nœuds chacun. Les fonctions de forme correspondantes pour cet élément peuvent être rédigées comme suit:

Le procédé de mise à jour de la géométrie est représentée **Fig.(III-2-1)**, la profondeur d'usure est très exagérée pour illustrer le concept. La procédure de la mise à jour de la géométrie a été utilisée avec succès dans le processus d'usure simulation. Un problème possible qui pourrait être rencontré lors des mises à jour du modèle. Le modèle de la méthode (FE) est d'abord créé d'une manière telle que tous les vecteurs normaux aux nœuds de surface, avant toute mise à jour est effectuée, sera dans une direction parallèle au bord de l'élément. Après plusieurs mises à jour de géométrie, il peut être prévu que le vecteur ne sera plus parallèle au bord[108,111,112].

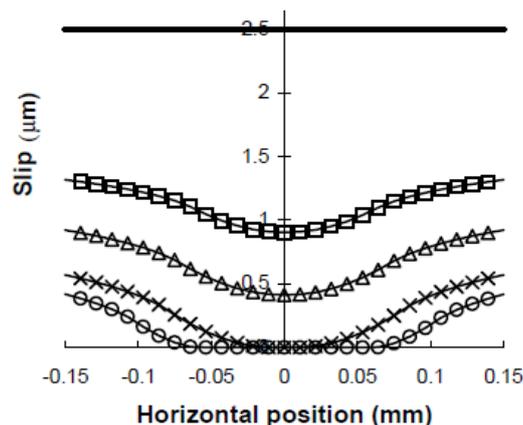


Figure.(III-2-1): Géométrie(en profondeur la géométrie du contact μm et horizontal en mm) de la mise à jour profonde d'une surface.[112]

III-2-4 Les commandes de l'usure utilisées par le code :

Un code de calcul a ses propres commandes pour une simulation, pour le cas de l'usure le code (Ansys) utilise les commandes suivantes :

- Les éléments de contacts (modèle de contact) qui prennent en charge l'usure CONTA171, CONTA172, CONTA173, CONTA174, et CONTA175.
- Pour activer l'usure par contact de surface, définir l'usure comme un modèle de matériau par une commande (TB, PORTER commande) et l'affecter à des éléments de contact.
- Les propriétés du matériau et d'usure via la commande (TBDATA).
- Vous pouvez utiliser la commande (TBFIELD) en collaboration avec (TBDATA) pour définir les propriétés en fonction de la température ou de temps.
- **La mise en œuvre de l'usure comporte deux étapes :**
 - Tout d'abord, le degré d'usure est calculé par un modèle d'usure.
 - La géométrie est mise à jour pour tenir compte de l'usure.
 - Le code appelle une sous-routine d'usure définie par (USERWEAR) Cette option est activée par la (TB, PORTER) commande avec (TBOPT, USER).
 - Les constantes matérielles requises par le modèle sont spécifiés comme éléments de données sur la commande (TBDATA).
- **Les constantes injectées dans un fichier donné dans le code sont :**
 - Coefficient d'usure C1, K
 - Matériau dureté C2, H
 - C3 exposant de pression
 - Vitesse de glissement exposant C4, n
 - C5 une option pour utiliser le modèle d'usure et activer cette option, par la commande (TBDATA).

Vous pouvez spécifier une usure, option définie par l'utilisateur qui utilise le sous-programme de USERWEAR..

III-2-5 Exemple d'un fichier de donné utilisé par le code de calcul pour la simulation de l'usure et l'affichage des résultats (géométrie):

Exemple d'un fichier de donné (paramètres d'entrée) injecté dans un code multi physique (Ansys) pour une simulation de l'usure.

Cette exemple répond aux conditions de contact thermomécanique de notre étude :

input Parameters

Exemple d'un fichier donner :
 Element types: Slider-Contact-
 Vitesse de glissement 0.75m/s
 Tempé:650°C
 Force= 20N
 Co-efficient of friction=0.14
 Young's modulus=0.8E5
 Density Matériau Slider=1490 kgm⁻³
 Base=1400 kgm⁻³
 Possion ratio: 0.3
 Conditions initiales et aux limites (géométrie de contact, cycle)

- **output Results Fig.(III-2-2).**

Résultat d'un contact frottant d'un matériau élastique après un cycle de fonctionnement

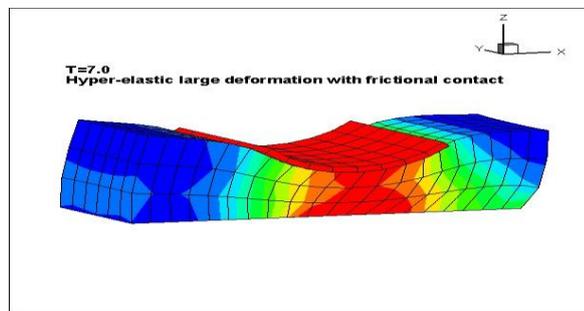


Figure.(III-2-2): Résultat d'une déformation d'un matériau élastique par une simulation [112]

III-2-6 Conclusion :

Au terme de ce chapitre, nous avons utilisé un algorithme pour simulation de l'usure d'un contact de deux matériaux de nature différent. Nous remarquons que plusieurs paramètres interviennent, et qui rendent la simulation de l'usure très délicate, (divergence du code), ces paramètres sont:

- Géométrie et type de contact.
- Type de maillage (géométrie), nombres de nœuds et éléments.
- Les conditions aux limites et initiales (paramètres tribologiques).
- Le cycle de fonctionnement.

nous avons utilisé aussi un modèle d'Archard modifié dans le but de calculer le volume d'usure d'un contact de deux matériaux par simulation, dans des conditions thermomécaniques sévères. Nous remarquons que l'originalité d'utilisation de ce modèle est la formulation qui prend en considération l'influence de la température, de la dureté $H_v(T)$ et du coefficient d'usure $K(T)$ en fonction de la température. Ce modèle calcule le volume d'usure par itération pendant un cycle, en tout point de la surface de contact par l'équation **(III-2-6)**, qui est une modification du modèle **(III-2-1)**.