

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI BOUNAAMA KHEMIS MELIANA  
FACULTE DES SCIENCE ET DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE



## Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique en

Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème :

**Amélioration du transfert de chaleur entre deux matériaux en contact  
rugueux**

**Réalisé par :**

ELEUDJAMA Nasreddine

BRAHIMI Radhwan

**Encadré par :**

Dr. CHADOULI Rachid

Année Universitaire : 2020/2021

## **Remerciements**

En tout premier lieu, nous remercions Allah, le tout- puissant, de nous donner la force et le courage pour surmonter toutes les difficultés et terminer la rédaction de ce mémoire.

Nous tenons à adresser sincères remerciements à notre promoteur, de mémoire de projet de fin d'études, le docteur CHADOULI Rachid.

Nous lui exprimons ici notre profonde gratitude pour la confiance, l'encouragement et la liberté qu'il nous a donnés tout au long de notre présentation, pour les idées et les critiques très constructives qu'il nous a données et pour leur disponibilité.

Nous adressons aussi nos remerciements à tous nos professeurs des années précédentes et en particulier ceux du département de la technologie.

Enfin, nous remercions tous ceux et celles qui nous ont aidés à nous rapprocher.

# DEDICACES

A ma très chère mère, source de tendresse.

A mon très cher père, Allah Yrahmo.

A mes frères et mes sœurs.

A tous mes chers amis.

Tous ceux qui m'ont aidé et encouragé.

N.ELEUDJAMA.

# DEDICACES

A mes très chers parents.

A toute ma famille.

A mes frères et mes sœurs.

A tous mes amis.

Tous ceux qui m'ont aidé et encouragé.

R. BRAHIMI.

## ملخص

هذا العمل هو دراسة تحليلية تهدف إلى استخلاص تأثير الخشونة والسائل بين الطبقات على المقاومة الحرارية للتلامس وبالتالي استنتاج كيفية تحسين انتقال الحرارة بين اثنين من المواد الصلبة في اتصال حقيقي. ويتم هذا من خلال دراستنا للانتقال الحراري بين مادتين صلبتين عموديتين مختلفتين (السطح العلوي ، السطح السفلي) في التوصيل الحراري ودرجة الحرارة مع افتراضات السطح الجانبية المعزولة لضمان الانتقال أحادي الاتجاه.

ومن المعلوم أن خطوط التدفق الحراري تنتقل من الصلبة 1 (في الأعلى) إلى الصلبة 2 (في الأسفل) عبر منطقة التلامس من ناحية ، من خلال نقاط التلامس التي لا تمثل سوى 10% من سطح التلامس الظاهري ، ومن ناحية أخرى ، من خلال الوسط المتداخل الذي يمثل 90% من السطح الكلي.

بفضل حساباتنا للمقاومة الحرارية للتلامس كدالة للخشونة والسائل المتداخل ، تبين لنا أن عامل المقاومة الحرارية للتلامس قد انخفض مع انخفاض الخشونة وزيادة السوائل المتداخلة وبالتالي فإن انتقال الحرارة بين مادتين صلبتين عند التلامس أفضل.

**الكلمات الرئيسية:** الخشونة؛ وسط متداخل ، المقاومة الحرارية الموصلية، الحرارية الموصلية.

## Résumé

Ce travail est une étude analytique visant à extraire l'effet de la rugosité et le fluide interstitiel sur la résistance thermique de contact RTC et à conclure ainsi comment améliorer le transfert de chaleur entre deux matériaux solides en contact réel. Pour ce faire, nous étudions le transfert thermique entre deux matériaux solides perpendiculaires (surface supérieure, surface inférieure) différents dans la conductivité thermique et la température avec hypothèses surfaces latérales isolées pour assurer un transfert unidirectionnel.

On sait que les lignes d'écoulement thermique de 1 (en haute) solide à 2 (en bas) traversent la zone de contact d'une part, par des points de contact qui ne représentent que 10 % de la surface de contact apparente, et, d'autre part, à travers le milieu interférométrique qui représente 90% de la surface totale.

Grâce à notre calcul de la résistance thermique de contact RTC en fonction de la rugosité et du fluide interstitiel, nous montrons le facteur de résistance thermique de contact diminué avec la diminution de la rugosité et l'augmentation de fluide interstitiel et donc transfert de chaleur entre deux matériaux solides en contact c'est meilleur.

**Mots clés :** Rugosité ; milieu interstitiel; RTC ; transfert de chaleur.

## **Abstract**

This work is an analytical study aimed at extracting the effect of roughness and interstitial fluid on the thermal resistance of RTC contact and thus to conclude how to improve the heat transfer between two solid materials in real contact. To do this, we study the thermal transfer between two perpendicular solid materials (upper surface, lower surface) different in thermal conductivity and temperature with isolated side surface assumptions to ensure unidirectional transfer.

It is known that the thermal flux lines pass from solid 1 (in high) to solid2 (downstairs) through the contact zone on the one hand, through the contact points which represent only 10% of the apparent contact surface and on the other hand, through the interstitial medium which represents 90% of the total surface.

Thanks to our calculation of the thermal resistance of contact RTC according to roughness and interstitial fluid, show us the thermal resistance factor of contact decreased with the decrease of the roughness and the increase of interstitial fluid and therefore heat transfer between two solid materials in contact it is better.

**key words:** Roughness; interstitial medium; RTC; Thermal conductivity.

## Table des matières

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	IV
Table des matières	VII
Liste des figures	IX
Nomenclature	XI
Introduction générale	1
<b>Chapitre I : Recherche bibliographique</b>	
I.1.Introduction	3
I.2.Les travaux de recherche réalisés dans le domaine de la thermique des interfaces.	3
I.3.Les travaux réalisés dans le but de calcul de la résistance thermique de contact	5
I.4.Les travaux qui définie les paramètres influençant sur la résistance thermique de contact ou le coefficient de transfert thermique	7
I.5.Conclusion	9
<b>Chapitre II : Resistance thermique de contact « RTC »</b>	
II.1.Introduction	10
II.2.Transfert de chaleur et l'équilibre thermique	10
II.3.Flux de chaleur	11
II.4.Densité de flux de chaleur	11
II.5.Les modes de transfert de chaleur	11
II.5.1.Transfert de chaleur par conduction dans les solides (ou les fluides au repos)	11
II.5.1.1. Flux de chaleur échangé par conduction – loi de Fourier	11
II.5.2.Transfert de chaleur par convection	12
II.5.2.1.Convection naturelle	13
II.5.2.2.Convection forcée	13
II.6.Définition de la résistance thermique de contact	13
II.7.Mécanismes de transfert de chaleur à travers le contact	15
II.8.Paramètres affectant la valeur RTC	16

## Table des matières

II.9.Influence de la pression de contact mécanique	17
II.10.Influence du liquide interstitiel	17
II.10.1.Conductivité thermique du fluide interstitiel	17
II.10.2.Pression de fluide interstitiel	18
II.11.Influence de l'oxydation de surface	19
II.12.Influence de la température d'interface	20
II.13.Influence de la direction du flux de chaleur	20
II.14.Influence de la topographie (la rugosité) de la surface	20
II.15.Les compteurs de rugosité	20
II.16.Conclusion	21
<b>Chapitre III : Etude analytique</b>	
III.1.Introduction	22
III.2.Modèle analytique	22
III.3.Bilan thermique	22
III.3.Conclusion	26
<b>Chapitre IV : présentation des résultats et discussions</b>	
IV.1.Introduction	27
IV.2. Résultats et discussion	27
IV.2.1.Étude d'impact de la rugosité sur le RTC	27
IV.2.2.Étude impact de la conductivité thermique de milieu interstitielle sur le RTC	32
IV.3.Conclusion	37
<b>Conclusion générale</b>	38
<b>Références Bibliographiques</b>	39

## Liste des figures

<b>Figure II.1 :</b> Champ de température dans deux solides: a) un contact parfait b) imparfait contact.	14
<b>Figure II.2 :</b> a) constriction macroscopique et b) constriction microscopique.	16
<b>Figure II.3 :</b> Résistance de contact en fonction de la pression mécanique.	17
<b>Figure II.4:</b> Variation quasi uniforme de la résistance de contact $R_c$ pour le vide, l'air et l'hélium.	18
<b>Figure II.5 :</b> Effet d'interstitielle de la pression du gaz.	19
<b>Figure II.6 :</b> RTC pour augmenter les charges. (1) Contact air-cuivre-cuivre, (2) contact air-cuivre- huile SISS705-cuivre.	19
<b>Figure III.1 :</b> Schéma de la surface de contact entre deux matériaux différents en contact réel.	23
<b>Figure III.2 :</b> Schéma de la distribution de flux unidirectionnel à travers contact réel.	23
<b>Figure III.3 :</b> Schémas électrique équivalent.	25
<b>Figure IV.1 :</b> Variation de RTC en fonction de la rugosité avec conductivité thermique a) : $\lambda_1=300$ W/m.K et $\lambda_2 = 220$ W/m.K, b) : $\lambda_1=250$ W/m.K et $\lambda_2 = 180$ W/m.K.	28
<b>Figure IV.2 :</b> Variation de RTC en fonction de la rugosité avec conductivité thermique a) : $\lambda_1=100$ W/m.K et $\lambda_2 = 60$ W/m.K, b) : $\lambda_1=70$ W/m.K et $\lambda_2 = 50$ W/m.K.	29
<b>Figure IV.3 :</b> Variation de RTC en fonction de la rugosité avec conductivité thermique a) : $\lambda_1=25$ W/m.K et $\lambda_2 = 10$ W/m.K, b) : $\lambda_1=20$ W/m.K et $\lambda_2 = 8$ W/m.K.	31
<b>Figure IV.4 :</b> Variation de RTC en fonction de la rugosité avec conductivité thermique des Six couples. a) : $\lambda_1=300$ W/m.K et $\lambda_2 =220$ W/m.K, $\lambda_1=100$ W/m.K et $\lambda_2 =60$ W/m.K et $\lambda_1=25$ W/m.K et $\lambda_2 =10$ W/m.K, b) : $\lambda_1=250$ W/m.K et $\lambda_2 =180$ W/m.K, $\lambda_1=70$ W/m.K et $\lambda_2 =50$ W/m.K et $\lambda_1=20$ W/m.K et $\lambda_2 =8$ W/m.K.	31
<b>Figure IV.5 :</b> Variation de RTC en fonction de milieu interstitiel avec des Conductivités thermiques a) : $\lambda_1=300$ w /m.K et $\lambda_2 =220$ w /m.K, b) : $\lambda_1=250$ w /m.K et $\lambda_2 =180$ w /m.K.	33
<b>Figure IV.6 :</b> Variation de RTC en fonction de milieu interstitiel avec des conductivités thermiques	

## Liste des figures

a) : $\lambda_1=100$  w /m.K et  $\lambda_2 =60$  w /m.K, b) : $\lambda_1=70$ w /m.K et  $\lambda_2 =50$ w /m.K. 34

**Figure IV.7 :** Variation de RTC en fonction de milieu interstitiel avec des conductivités thermiques

a) : $\lambda_1=25$  w /m.K et  $\lambda_2 =10$  w /m.K, b) : $\lambda_1=20$  w /m.K et  $\lambda_2 =8$  w /m.K. 35

**Figure IV.8 :** Variation de RTC en fonction de milieu interstitiel avec des conductivités thermiques

des six couples a) : $\lambda_1=300$  w /m.K et  $\lambda_2 =220$  w /m.K,  $\lambda_1=100$  w /m.K et  $\lambda_2 =60$  w /m.K et

$\lambda_1=25$  w /m.K et  $\lambda_2 =10$  w /m.K, b) :  $\lambda_1=250$  w /m.K et  $\lambda_2 =180$  w /m.K  $\lambda_1=70$  w /m.K et  $\lambda_2$

$=50$  w /m.K et  $\lambda_1=20$  w /m.K et  $\lambda_2 =8$  w /m.K. 36

## Nomenclature

a	Diffusivité thermique	$m^2/h$
c	la capacité thermique massique du matériau	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D	Largeur	m
e	Épaisseur	m
$h_c$	Coefficient de convection	$w \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
g	Gravité	$m^2/s$
P	Pression	bar
Q	Densité de Flux thermique	$w/m^2$
q	Flux thermique	W
Ra	Rugosité des surfaces	$\mu m$
$R_s$	Résistance thermique d'un solide	$K/w$
RTC	Résistance thermique de contact	$m^2 \cdot K/W$
S	Surface	$m^2$
T	Température	K
$T_c$	Température du corps chaud	K
$T_f$	Température du corps froid	K
Z	Coordonnées cartésiennes	m
$\rho$	Densité du corps	$Kg/m^3$

$\Delta T$	Différence de température	K
$\lambda$	Conductivité thermique	w/m.K
$\nu$	Viscosité cinématique	kg/m.s

# **Introduction générale**

## Introduction générale

---

Le transfert de chaleur peut être défini comme le transfert d'énergie d'une région à une autre à la suite d'une différence de température entre elles. Comme il existe des différences de température dans tout l'univers, il, cependant, le transfert de chaleur n'est pas régi par une seule relation, mais par une combinaison de plusieurs lois indépendantes de la physique.

Le flux de chaleur par conduction se produit en raison de collisions entre les atomes et les molécules d'une substance et du transfert ultérieur d'énergie cinétique. Les atomes "chauds" entrent en collision avec les atomes "froids". Dans de telles collisions, les atomes rapides perdent de la vitesse et les plus lents gagnent en vitesse. Bientôt, les plus rapides transfèrent une partie de leur énergie aux plus lents. Ce transfert d'énergie du côté chaud vers le côté froid est appelé flux de chaleur par conduction. Différents matériaux transfèrent la chaleur par conduction avec différentes vitesses. Ceci est une mesure de conductivité thermique.

Les matériaux ayant une conductivité thermique plus élevée transféreront de plus grandes quantités de chaleur par unité de temps - de tels matériaux, comme le cuivre, sont de bons conducteurs thermiques. En revanche, les matériaux à faible conductivité thermique transfèrent de petites quantités de chaleur par unité de temps - ces matériaux, comme le Teflon, sont de mauvais conducteurs thermiques.

Lorsqu'il y a apparition de systèmes composites, c'est-à-dire deux matériaux ou plus en contact l'un avec l'autre, une variation du coefficient de conductivité thermique est observée lorsqu'elle est mesurée entre deux points séparés par l'interface de contact. Cette différence est due à la résistance thermique de contact. Cette résistance de contact est principalement due aux effets de la rugosité de surface. Une telle rugosité diminue la surface de contact réelle entre les interfaces et les espaces formés sont remplis d'air atmosphérique. De cette façon, le transfert de chaleur se produira par conduction à travers la zone de contact réelle et le rayonnement et/ou la conduction à travers les espaces. Étant donné que les interstices sont remplis d'air et que l'air est un mauvais conducteur thermique, la conductivité thermique mesurée entre les points séparés par cette interface sera plus faible en raison d'une chute de température considérable.

L'objectif de ce travail est d'améliorer le transfert thermique entre deux matériaux en contact rugueux et de conclure comment ajuster les facteurs qui les affectent afin d'obtenir de bons résultats.

## Introduction générale

---

Dans la première partie, nous avons parlé des recherches scientifiques liées au domaine des interfaces thermiques et de la précision des travaux effectués dans le but de calculer la résistance thermique, qui concerne l'amélioration du transfert thermique entre deux matériaux rugueux.

Dans le deuxième chapitre, nous avons rappelé les notions de base de la Transfer thermique et de ses équations et avons beaucoup parlé sur les facteurs affectant sur la résistance thermique comme la rugosité et le fluide interstitielle.....et Les résultats obtenus par plusieurs chercheurs.

Le troisième chapitre est une étude analytique au début, nous avons fait quelques simplifications telles que la modélisation et en considérant que la surface de contact réelle est 10% de la surface totale,

Ce dernier chapitre nous avons déterminé la valeur de la RTC a travers l'équation analytique et dessinée des courbes de RTC en fonction de la rugosité et de la thermique de milieu interstitiel par Excel et leur discussion comme même.

Le document se termine par des conclusions et des perspectives

Chapitre I  
Recherche  
bibliographique

## I.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous parlerons sur les travaux de recherche réalisés dans le domaine de la thermique des interfaces. En particulier de la résistance thermique de contact et les paramètres sur lesquels il a est affecté, qui vise à améliorer le transfert thermique entre deux solides en contact rugueux.

## I.2.Les travaux de recherche réalisés dans le domaine de la thermique des interfaces

Q.Q. Zhou L et al. [1] ont mis au point un cadre de couplage thermodynamique cohérent qui combine les unités à bande de phase de la fracture fragile dans la matière en vrac avec les unités de surface cohérentes de l'interface du canal avant TBC. Ils ont divisé la libération d'énergie critique en deux parties, distinguant l'interface de la défaillance des matériaux en vrac, et obtenant l'équivalent du développement de l'intervalle et d'autres variables.

Chao Zhang et al. [2] ont développé un modèle analytique pour prédire les pressions thermiques dans l'interface de multiplication des fibres dans les véhicules avec des fibres continuellement améliorées. En insérant des défauts initiaux dans la planification des fibres, ils ont trouvé des champs de déplacement thermique et ont identifié la contrainte thermique résiduelle en utilisant des relations de contrainte linéaires pour réduire la température de contrainte résiduelle à l'avant des fibres coulées qui peuvent éliminer les fissures. Les résultats obtenus montrent que la contrainte devait être supérieure à la valeur seuil calculée pour les chocs et que le seuil devait être réduit par application préalable.

Heiji Watanabe et al. [3] ont utilisé la microscopie électronique, le balayage et les spectres de vis à électrons pour étudier l'impact des structures de surface primaires sur les processus d'oxydation et de pyrolyse. Leurs observations ont montré que des traces de ces zones ont été préservées dans les intérieurs après la reconstruction de surface a disparu. Les résultats obtenus montrent que la structure atomique à l'interface et la stabilité contre la pyrolyse de la membrane d'oxyde étaient influencées par les structures de surface primaires.

Chang Ding et al. [4] ont établi une structure expérimentale qui permettrait de vérifier les processus de contact thermique par des joints en plastique renforcés par des fibres de verre en acier inoxydable et d'étudier les effets de la pression de contact d'interface et de la température d'interface

médiée sur les conducteurs thermiques. Les résultats obtenus montrent que les processus de contact thermique augmentaient avec l'augmentation de la pression de contact, mais diminuaient avec l'augmentation de la température moyenne d'interlude.

S Roy C et al. [5] ont travaillé sur la stabilisation thermique des interfaces de carbure de silicium jusqu'à 800 °C en est utilisée la spectrométrie secondaire de masse ionique et la spectrométrie de reflux de Rother Ford et les études d'interférence de diffraction des rayons X en vue d'utiliser le ruthénium comme portail métallique stable pour les capteurs de gaz à haute température. Les résultats obtenus montrent que le fait de perturber cette séparation à une température beaucoup plus élevée (800 °C) entraîne la formation de silicides de ruthénium à l'interface sur une zone étroite avec l'oxydation des quelques couches supérieures de ruthénium.

D. Faccio A et al. [6] ont mesuré la profondeur de la zone non cellulaire à l'aide d'une technique marginale intelligente combinée à un forage dans de l'acide fluorhydrique pour déterminer l'effet de la connexion silice-silicate de verre germanique au cours de la cellule photo thermique. Les résultats obtenus montrent que la couche médicamenteuse germanique agit comme une barrière à la migration des granules à la température standard et à la tension de polarisation. Ils ont également constaté que le problème peut être surmonté par la polarisation à une température et une tension plus élevées, telles que 320 °C et 8 kV.

Eimutis Juzeliūnas et al. [7] ont utilisé le dispositif d'interférence quantique supraconductrice causé par le contact avec le métal liquide. Et ils ont utilisé un magnétomètre à haute parité d'azote liquide. Les champs magnétiques (db) étaient à la fois générés naturellement et en parallèle avec l'interface lorsque le fluide était connecté à la surface du métal, à condition que les deux phases se trouvassent à des températures différentes, générer des champs magnétiques à l'amorçage thermique des courants internes dans la phase métallique. Les résultats obtenus montrent que l'ampleur de l'effet de db peut être comparée aux champs magnétiques résultant de réactions de corrosion.

K. Song, H.P et al. [8] ont analysé la distribution des pressions thermiques à proximité d'une incision de façade dans un matériau binaire soumis à un courant électrique à distance. Un accent particulier a été mis sur l'impact de l'électricité sur les facteurs d'intensité de la pression thermique. Les résultats obtenus montrent que suggèrent que l'électricité peut soit intensifier, soit neutraliser les facteurs de stress thermique en fonction des paramètres du matériau binaire.

H.S. Udaykumar L et al. [9] ont développé une méthode numérique de simulation de durcissement de solution/alliage, qui résout les équations de transfert de chaleur et calcule la forme de l'interface, les champs thermiques et les champs solides d'une manière entièrement compatible,

où les effets des fluctuations entrent dans la dynamique de l'interface. Le cadre mixte actuel Eulerian-Lagrangian traite la limite de phase submergée comme un front aigu de fluide solide. Les résultats obtenus montrent que la méthode peut calculer l'effondrement de l'interface de fluide solide en raison de l'instabilité de Mullins.

Majid Bahrami et al. [10] ont étudié l'impact de l'état des parois du réacteur sur les propriétés du forage au plasma de l'arbone à haute densité. Ils ont foré l'oxyde, le nitrure et le silicium dans une source de plasma à couplage inductif alimentée avec divers nutriments, tels que CHF<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>/H<sub>2</sub>. Les résultats obtenus montrent que la température de la paroi du réacteur est un facteur important dans le processus de forage. Un contrôle adéquat de la température peut augmenter la sélectivité de l'oxydation sur le nitrure et le silicium.

H.S. Fang Y.Y et al. [11] ont identifié les relations entre la convexité de l'interface S/L et les paramètres de croissance, c'est-à-dire le taux de rotation du cristal, la taille du cristal, l'isolation du four et l'antenne RF. Le stress thermique est représenté par le stress de Von mises, et l'état de stress dans le cristal en croissance est caractérisé par le stress maximal de Von mises. Des courbes sur les critères de croissance et sur la contrainte maximale de Von Mises ont été obtenues. Selon l'analyse, ils ont pu obtenir une interface S/L de niveau ou légèrement compacte en ajustant les paramètres de croissance, améliorant la qualité du cristal en réduisant la contrainte thermique et les défauts associés.

### **I.3. Les travaux réalisés dans le but de calcul de la résistance thermique de contact**

E. Chapelle B et al. [12] ont ajouté des particules thermo-conductrices pour augmenter la conductivité thermique des polymères, pour des composés très remplis et donc pour une conductivité thermique très efficace. Ils ont mis en place une configuration d'irrigation entre les fils de nickel (particules de fibre) qui sont quelques dizaines de micromètres de diamètre et la matrice de polyum. Les résultats obtenus montrent que certaines mesures d'irrigation ont été validées à l'aide d'un modèle thermodynamique flexible.

Mostafa H et al. [13] ont étudié la résistance thermique effective des systèmes géothermiques verticaux, des canalisations aux puits, et ont effectué des analyses pour déterminer quels paramètres techniques n'ont pas encore eu d'impact sur cette résistance. Les résultats obtenus montrent que les modèles disponibles ne représentent pas avec précision la résistance thermique effective des conduites aux puits.

Aïssa Allaoui et al. [14] ont suggéré une évaluation de la résistance au contact entre les nanotubes de carbone pour la mesure en vrac de leur enchevêtrement. Ils ont effectué des tests de compression mesurant la résistance des illusions simultanément sur des nanoparticules de carbone. Ils ont analysé les données expérimentales à l'aide d'un modèle de réseau de contact pour obtenir une estimation de la résistance aux nanotubes de carbone. Les résultats obtenus montrent que la résistance à la contact a chuté à un niveau de magnitude et atteint des valeurs de 100 kΩ.

Germán P et al. [15] ont développé une connexion électrique appropriée entre CDTe et le joint métallique est l'un des obstacles dans la fabrication de cellules solaires flexibles sur des mousses métalliques. Du point de vue du coefficient de dilatation thermique correspondant, le molybdène est préféré comme aliment de base. Cependant, la grande différence dans le travail, la fonction CDTE et Mo exigent qu'Interlayer ne soit pas corrigé. Les résultats obtenus montrent qu'un facteur de contact AU mince semble réduire la résistance au contact, et discuter de la dépendance de la morphologie du film sur le substrat ainsi que de la température du substrat.

Marius Dillig et al. [16] ont étudié expérimentalement la résistance au contact thermique entre différents composants de l'unité SOFC à des températures variables jusqu'à des températures de fonctionnement normales (800 °C). Les taux de transfert de chaleur sont obtenus pour les unités de réplification complètes, les cellules seulement, les cellules de contact seulement et les ensembles de fermeture. Les résistances d'interface thermique entre corrélation et corrélation sont calculées sur la base de données mesurées et fournissent des informations sur la modélisation numérique de la pile SOFC.

Carlos D et al. [17] ont élaboré un modèle pour le mécanisme décrit. (2006) a fourni une formulation pour prédire la contribution des zones de contact à la conductivité thermique efficace. La propagation de la résistance a dans ce travail en raison du profil  $h(r)$ , est réévaluée par des calculs numériques. Il a été démontré que la forme de  $h(r)$  a un impact significatif sur  $a$  et un effet plus faible, mais tout de même significatif, sur la résistance au contact universel. Les résultats ont été correctement liés à une image connectée de la figure  $h(r) = h_0 [1 - (r/a)^2]$  p.

Zheng Yuan et al. [18] ont proposé une nouvelle définition du « facteur d'efficacité » qui implique la puissance d'entrée thermique au lieu de la différence de température entre les puces est suggérée pour évaluer l'efficacité de ce type de  $\mu$ TEGs. L'avantage de ce nouveau facteur d'efficacité est qu'il prend en considération la résistance thermique du  $\mu$ TEG. Avec une résistance thermique de 78 K/W. Les résultats expérimentaux montrent que le  $\mu$ TEG peut fonctionner avec une différence de température élevée (jusqu'à 267 K). Avec une structure optimisée, i.e. 5 membranes et

polySi recuit comme matériau principal TE, la puissance de sortie maximale de notre  $\mu$ TEG est de  $138 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  lorsque la puissance d'entrée est de  $4 \text{ W}/\text{cm}^2$  et son nouveau facteur d'efficacité correspondant est de  $865 \mu\text{m}^2/\text{W}$ .

Dongmei Bi et al. [19] ont utilisé la méthode thermique pour mesurer la résistance au contact thermique entre les solides dans la plage de température de 70 à 290 K et la plage de pression de 0,2 à 0,7 mPa. Ils ont démontré la relation entre le système de contrôle de la technologie des missiles (MTCR) et la température à une pression de contact donnée et ont expliqué ce phénomène.

Tengfei Cui et al. [20] ont mis au point un algorithme approprié pour la caractérisation de la topographie de surface traitée mécaniquement par rotation et meulage de la surface, qui fournit des méthodes de modélisation de surface précises et pratiques pour la prédiction de l'antigène du bromure de méthyle. Ils ont démontré une corrélation entre la rugosité de la surface et la longueur d'onde et la hauteur des éléments dans ces deux types de surfaces robotisées. Sur la base des transformations de Fourier, des modèles de topographie de surface sont proposés pour les surfaces de rotation lith et les surfaces de meulage pour les terminaisons. Les modèles de surface présentés sont appliqués à des approches de simulation régionales microscopiques et multi-échelles pour vérifier la précision des modèles de surface présentés. Les résultats montrent que la longueur d'onde courte est capable d'augmenter la zone de contact réelle.

T. Fiedler et al. [21] ont étudié la résistance au contact électrique et thermique dans les grappes métal-graphite mousse, et son application réussie nécessite la minimisation de la résistance de contact thermique et électrique entre les composants. Ils ont développé à la fois une résistance avec une pression accrue entre la mousse métallique et les feuilles de graphite et la réduction de ces résistances de contact. Les résultats obtenus montrent que les résistances électriques et thermiques diminuent de façon monotone avec l'augmentation de la force de compression lors du passage d'une force de compression nulle à une légère d'environ 100 N (correspondant à une contrainte de compression de 0,01 MPa).

#### **I.4. Les travaux qui définissent les paramètres influençant sur la résistance thermique de contact ou le coefficient de transfert thermique**

A.A. Yevtushenko M et al. [22] ont pu résoudre un problème thermique de frottement tout en exhibant un trépied/tampon/disque à trois systèmes de calibre avec une force de frottement et de transfert de chaleur spécifique en fonction du temps à travers une surface de contact. Ils ont étudié

l'effet de la durée de l'augmentation de la pression et numéroté les maisons sur la température des matériaux tels que les disques en fonte / buse en céramique métallique / calibre en acier.

Y. Yan X.J. et al. [23] ont mené une étude sur l'instabilité de la résistance au contact avec les temps de stress. Ils ont constaté que deux paramètres physiques contribuent à déstabiliser cette résistance du contact : le premier est d'augmenter la tension de seuil et le second est d'augmenter la longueur effective de contact. Les résultats obtenus montrent que le piégeage de la charge dépendant du temps est responsable de l'effet de contrainte de biais dans les transistors organiques à couche mince.

Qingyu Meng et al. [24] ont travaillé à déterminer les paramètres affectant les propriétés de la contact et à vérifier la précision du modèle de réseau de résistance thermique en testant l'augmentation de la température. Les résultats montrent comment la température affecte la résistance thermique. (Lorsque la température augmente, la résistance thermique diminue).

Xing-Jie Ren et al. [25] ont effectué un examen numérique de la résistance au contact thermique d'une paire de structures revêtues de 8 faisceaux de satin lorsque les espaces d'interface étaient remplis d'antennes. Les résultats montrent que La résistance au contact thermique diminue avec une augmentation de la pression de charge et de la température et Les effets du rayonnement thermique interstitiel sur la résistance de contact thermique prévue augmentent avec l'augmentation de la température.

Maohua et al. [26] ont étudié les propriétés thermiques des connexions en fibre de carbone et en graphite. Avec un rapport carbone-graphite de 1:1, la résistance thermique peut être réduite à 1,8, 10 Km<sup>2</sup> et 1:30 psi, bien que la conductivité thermique totale diminue de 34 à 19 Wm<sup>-1</sup> Km<sup>-1</sup>. Ils ont étudié l'effet synergique entre la fibre de carbone et le graphite et ont appliqué deux types différents de mesures de conductivité thermique pour démontrer que le graphite contribue à la conductivité thermique globale

Biao Feng et al. [27] ont appuyé sur un dispositif d'autodétermination améliorée et stable pour mesurer le COT entre les interfaces d'érythritol, l'alcool sucré rentable avec un potentiel d'école de santé local élevé à température moyenne, et de multiples métaux, y compris le SS304, et le nickel léger. (Alliage de cuivre-nickel-zinc III) et 1060 Al. Ils ont soigné des composés métalliques/érythritol en faisant fondre naturellement l'érythritol qui a durci à la surface de fines

plaques métalliques. Ils ont mesuré la variation entre les interfaces métal/érythritol en fonction de la rugosité de surface (des plaques métalliques) et de la pression de contact appliquée (entre les interfaces). Les résultats obtenus montrent qu'à mesure que la rugosité de la surface diminue, le RTC est également réduit grâce à une meilleure contact de l'interface, et donc une réduction significative du RTC à haute pression de contact.

Tengfei Cui et al. [28] ont développé un modèle multi-échelles pour résister au contact thermique entre deux surfaces approximatives. Ils ont appliqué les méthodes LB et FD, respectivement, à deux régions différentes avec des amplificateurs différents et ont créé un espace commun pour la transmission d'informations frontalières entre ces zones pour assurer la continuité des paramètres physiques. Les résultats obtenus montrent que le CCF est affecté par plusieurs facteurs, tels que la rugosité de la surface, l'altération de la surface, la pression, la dureté partielle et la conductivité thermique, qui affectent considérablement le CCF à basse pression. Lorsque la pression augmente, la pression et la rigidité partielle jouent un rôle dominant dans la pression comprimée.

## **I.5.Conclusion**

D'après cette recherche bibliographique, nous concluons que la plupart des études dans le domaine du transfert thermique des surfaces sont basées sur l'étude de l'évolution de résistance thermique de contact pour le réduire en but de l'améliorer le transfert de chaleur entre deux solides en contact.

# Chapitre II

## Résistance thermique de contact

**II.1.Introduction**

Le transfert de chaleur à travers l'interface formée par deux corps en contact est un phénomène complexe. Au cours des 30 dernières années, de nombreux travaux ont été développés et publiés sur ce sujet. Le fait qu'aujourd'hui encore une grande importance soit accordée aux recherches expérimentales indique que le phénomène de résistance thermique des contacts n'a pas été complètement épuisé. Plusieurs paramètres affectant cette résistance ont été analysés par plusieurs auteurs. Un résultat expérimental obtenu ne peut pas être utilisé pour déterminer la résistance thermique des contacts de tous les couplages, s'ils sont différents, c'est-à-dire s'ils ont des paramètres de surface et/ou des propriétés mécaniques différents de ceux étudiés. Il est cependant possible d'utiliser ces résultats expérimentaux pour déterminer la manière dont divers paramètres affectent la résistance thermique des contacts.

Dans ce travail, les surfaces réelles, trouvées dans l'ingénierie, résultant des processus d'usinage et de la finition ultérieure sont considérées. C'est un fait que chaque surface travaillée mécaniquement présente des ondulations et des rugosités, résultant du processus de fabrication, des vibrations de la machine, des contraintes résiduelles, etc. Ces caractéristiques de surface peuvent être déterminées au moyen d'un profilage. Les irrégularités de surface qui ont une grande longueur d'onde, et les micro-irrégularités, dont les pics déterminent la rugosité du matériau, sont appelées rugosité. La rugosité détermine la qualité de finition d'une surface

Ainsi, lorsque deux surfaces réelles sont mises en contact sous pression, elles ne se touchent qu'en quelques points, sans contact réel sur de grandes surfaces. L'espace entre les surfaces à l'interface est occupé par le fluide ambiant, tel que l'air.

De nombreux facteurs influencent la résistance thermique des contacts, certains cependant prédominent sur d'autres. Dans ce chapitre, seuls les facteurs les plus importants sont mentionnés. Chaque fois qu'un facteur est pris en compte, tous les autres sont considérés comme constants, afin d'analyser chaque effet individuel.

**II.2.Transfert de chaleur et l'équilibre thermique**

Le transfert de chaleur, le transfert thermique ou la transmission de chaleur est le phénomène physique qui implique le transfert d'énergie calorifique d'un milieu à un autre.

Cela se produit lorsque deux systèmes à des températures différentes entrent en contact, permettant le flux d'énergie du point de température le plus élevé au plus bas, jusqu'à atteindre un équilibre thermique, dans lequel les températures sont égalisées.

Le processus de transfert de chaleur est imparable (ne peut pas être arrêté) mais lent (peut être décéléré), en utilisant des barres et des isolants. Mais chaque fois qu'il y a une différence de chaleur dans l'univers, la chaleur aura tendance à se transférer à travers les médias disponibles. Selon eux, ce transfert peut se produire dans trois modes : conduction, convection et rayonnement.

### II.3. Flux de chaleur

Un flux de chaleur est une quantité d'énergie transférée sous forme de chaleur par unité de temps. C'est donc une puissance, qui s'exprime en Watt (J/s) :

$$q = \frac{Q}{t} = \dot{Q} \quad (\text{II.1})$$

### II.4. Densité de flux de chaleur

En général, le flux échangé à travers une surface n'est pas uniforme sur toute la surface. On définit alors une densité de flux de chaleur,  $\phi$ , qui correspond à un flux de chaleur par unité de surface (en W/m<sup>2</sup>). [29]

### II.5. Les modes de transfert de chaleur

#### II.5.1. Transfert de chaleur par conduction dans les solides (ou les fluides au repos)

Le processus de transfert de chaleur par conduction s'appuie sur un milieu matériel sans mouvement de matière et est dû à des phénomènes physiques microscopiques (agitation des atomes ou des molécules, flux d'électrons libres...). Il peut être vu comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques (les particules chaudes qui ont une énergie de vibration élevée) vers les particules les moins énergétiques (les particules froides d'énergie de vibration moins élevée), dû aux collisions entre particules. Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres dans le réseau cristallin (par exemple pour les métaux). Ainsi les bons conducteurs d'électricité sont en général également de bons conducteurs de la chaleur. [29]

##### II.5.1.1. Flux de chaleur échangé par conduction – loi de Fourier

Ce mécanisme de transfert est régi par une loi phénoménologique établie par Joseph Fourier en 1822, stipulant que la densité de flux échangée par conduction est proportionnelle au gradient de

température (proportionnalité entre la cause (le gradient) et l'effet (le flux)). Cette loi, appelée loi de Fourier, s'écrit :

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla}T \quad (\text{II.2})$$

Le signe '-' intervenant dans cette loi traduit le fait que le flux de chaleur circule des zones chaudes vers les zones froides (dans le sens opposé au gradient de température).

Le coefficient de proportionnalité,  $\lambda$ , est la conductivité thermique, en W/m/K.

La conductivité thermique dépend de la nature du corps considéré et dépend généralement de la température. Elle traduit la capacité d'un matériau à transporter la chaleur par conduction.

Ainsi, pour un gradient de température donné, le flux de chaleur sera d'autant plus important que la conductivité sera grande. Pour les matériaux conducteurs de la chaleur,  $\lambda$  sera élevée et inversement sera faible pour les isolants. Exemples à la température ambiante :

$$\lambda_{\text{Laine de verre}} = 0.04 \text{ W/m/K.}$$

$$\lambda_{\text{air}} = 0.026 \text{ W/m/K (l'air immobile est un très bon isolant).}$$

$$\lambda_{\text{verre}} = 1.2 \text{ W/m/K.}$$

$$\lambda_{\text{cuivre}} = 390 \text{ W/m/K.}$$

Par ailleurs, pour un flux de chaleur donné, le gradient de température sera d'autant plus faible que  $\lambda$  est grand. Pour des flux modérés, on pourra ainsi dans certains cas considérer que la distribution de température à l'intérieur d'un corps de grande conductivité thermique est quasi uniforme. [29]

### II.5.2. Transfert de chaleur par convection

Le mode de transfert de chaleur par convection englobe deux mécanismes : la diffusion (mouvement moléculaire aléatoire d'un fluide) et l'advection (mouvement global du fluide). Cet échange de chaleur est associé au mouvement d'un fluide transportant de la chaleur depuis une surface. Pour que la convection se produise, il est nécessaire d'avoir une diffusion de chaleur dans les premières couches entre la surface solide et le fluide adhérent à cette surface. A partir de ce moment, le mouvement convectif aide à transporter la chaleur dans le sens du flux. Le transfert thermique par convection entre la surface et le fluide est exprimé par la loi de refroidissement de Newton, où le flux thermique local est donné par

$$q_{conv} = h (T_w - T_{\infty}) \quad (II.3)$$

Où  $h$  est le coefficient de transfert de chaleur par convection locale,  $T_w$  est la température de surface et  $T_{\infty}$  est la température du fluide dans le flux libre, à l'extérieur de la couche limite. Le  $h$ , comme mentionné précédemment, est difficile à déterminer en fonction de la nature de l'écoulement du fluide, de la géométrie de la surface et des propriétés du fluide. Une grande partie des connaissances nécessaires pour résoudre les problèmes de convection provient de l'étude des couches limites. En transfert thermique, les analyses sont effectuées en termes de groupes adimensionnels tels que les nombres de Nusselt, Grashof, Rayleigh, Reynolds et Richardson. [29]

On distingue deux types de convection :

**II.5.2.1. Convection naturelle:** les mouvements sont d'une variation de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) et/ou par des gradients de composition.

**II.5.2.2. Convection forcée:** Le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).

On parlera de convection mixte lorsque les deux types de convection coexistent dans un système.

## II.6. Définition de la résistance thermique de contact

La définition du RTC peut être présentée en analysant le transfert de chaleur et le champ de température en régime permanent à l'intérieur de deux matériaux en contact. Considérons deux corps, constitués de deux matériaux 1 et 2, en contact (figure). Soit  $\phi$  le flux de chaleur traversant la Surface  $S$ . Si le contact est parfait, les champs de température  $T_1(x)$  et  $T_2(x)$  ne subissent aucune perturbation dans l'interface de contact (figure). C'est une situation idéale dans laquelle les surfaces sont parfaitement lisses et le contact est dit Parfait. Dans le cas réel, Figure 1B, les surfaces présentent des irrégularités et le contact n'est pas parfait. La présence d'irrégularités de surface ne provoque que quelques pics de rugosité de toucher et par conséquent la surface de contact réelle est beaucoup moins que la surface de contact apparente (de l'ordre de 1% de la surface de contact) [30].

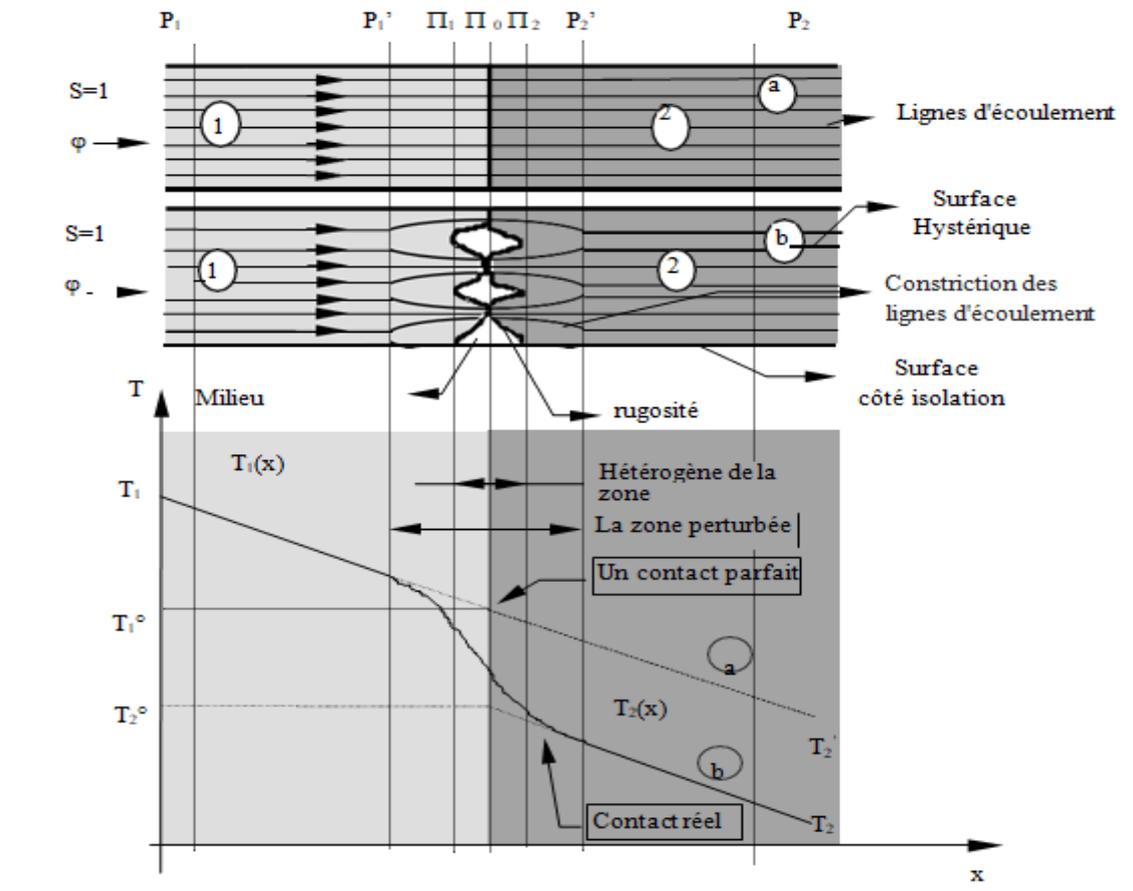


Figure II.1 : Champ de température dans deux solides : a) un contact parfait e b) contact imparfait[31]

Les imperfections de surface à l'interface constituent un obstacle au passage de la chaleur et sont à l'origine de la perturbation dans le champ de température (zone perturbée) près du contact où l'on peut distinguer une zone hétérogène dans laquelle les aspérités sont et le liquide interstitiel. Cette perturbation est représentée par le schéma RTC qui suppose zéro l'épaisseur de la zone perturbée et remplace les variations de température à l'intérieur de cette zone par une forte variation de température, (obtenu en extrapolant les champs de température à l'interface), situé à l'interface théorique de contact des deux solides.

Mathématiquement, la surface unitaire RTC peut être donnée par :

$$RTC = \frac{T_{ch} - T_f}{q} \tag{II.4}$$

## II.7.Mécanismes de transfert de chaleur à travers le contact

En raison des irrégularités de surface, deux façons sont possibles pour le passage de la chaleur d'un milieu à l'autre : l'un à travers le contact solide-solide entre les pics de rugosité et l'autre à travers le fluide interstitiel qui occupe les espaces vides des irrégularités de surface.

De cette façon, il peut être vérifié, tel que présenté par Snaith et coll. (1986), que les mécanismes de transfert de chaleur à travers ces voies sont :

- a) Conduite à travers les surfaces de contact réelles.
- b) Convection et conduction à travers le liquide interstitiel.
- c) Rayonnement à l'intérieur des espaces interstitiels.

En raison de la petite taille des cavités de l'espace interstitiel, le transfert de chaleur par convection peut être ignoré ; ainsi, seule la conduction de la chaleur à travers le fluide est considérée.

La contribution du rayonnement est négligeable lorsque les températures sont basses. Pour les surfaces métalliques en contact, la contribution du rayonnement dépasse rarement 2% de conductance globale si les températures sont inférieures à 900 K.

Dans les cas où la convection et le rayonnement sont négligeables, le flux de chaleur est purement conducteur et la résistance thermique totale peut être considérée comme la somme des composants suivants :

- a) Résistance des régions en dehors de la zone de constriction.
- b) Résistance des régions en dehors de la zone de constriction résistance due à la constriction macroscopique des lignes d'écoulement causée par des ondulations des surfaces de contact (Figure 2a)
- c) Résistance due à la constriction microscopique des lignes d'écoulement aux points de contact réels (Figure 2b)

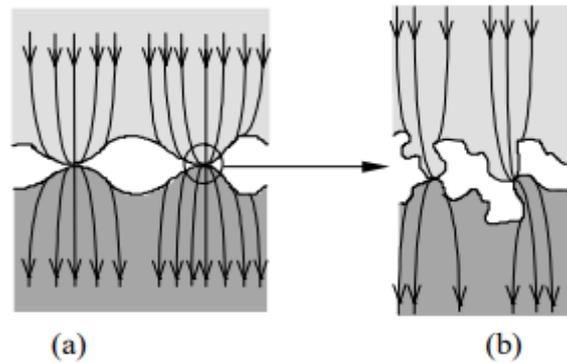


Figure II. 2 : a) constriction macroscopique et b) constriction microscopique. [32]

### II.8. Paramètres affectant la valeur RTC

RTC n'est pas une propriété intrinsèque des matériaux, mais un paramètre qui caractérise la difficulté rencontrée par la chaleur lors du déplacement d'un milieu à un autre. Études présentées par Laurent (1969), Bardon et coll. (1971) et Snaith et coll. (1986) montrent l'influence d'un grand nombre de paramètres qui affectent de manière significative la valeur du RTC, parmi lesquels on peut citer :

- a) L'état géométrique des surfaces avant et après leur mise en contact (rugosité, planéité, etc.)
- b) Les distributions des surfaces en contact réel
- c) Les formes et les volumes des espaces interstitiels
- d) L'épaisseur des couches superficielles (oxydes, etc)
- e) Une conductivité thermique des solides en contact et milieu interstitiel
- f) L'histoire du chargement mécanique,
- g) La direction du flux de chaleur, etc.

Ces paramètres dépendent à leur tour d'autres paramètres tels que :

- a. Les propriétés mécaniques des matériaux (module d'élasticité, coefficient de Poisson, limite élastique, dureté, etc.).
- b. Pression de contact mécanique.
- c. La pression du liquide interstitiel.
- d. La nature chimique des composés de surface (oxydation, carburation, etc.)
- e. Température.
- f. Le temps, etc.

La prédiction théorique du RTC ne peut donc pas être faite strictement, car il est très difficile d'évaluer précisément tous ces paramètres.

L'influence de certains de ces paramètres est présentée ci-dessous. [30,32,33]

## II.9. Influence de la pression de contact mécanique

La pression de contact mécanique est le paramètre le plus important qui affecte la valeur RTC. Les études de Laurent (1969) et Bardon (1971), entre autres, montrent que la résistance de contact diminue avec l'augmentation de la pression mécanique. [33,34]

Lorsque deux corps sont mis en contact pour la première fois et que la charge mécanique est augmentée jusqu'à ce qu'une valeur de  $P_m$  soit atteinte, les variations RTC sont souvent plus fortes en raison des déformations élastiques et plastiques qui se produisent sur les surfaces (courbe a). Lorsque sur les mêmes échantillons les essais sont effectués dans le sens opposé, c'est-à-dire en soulageant la charge mécanique, le RTC ne revient plus à sa valeur initiale, car les déformations plastiques qui se produisent dans certains pics de contact modifient en permanence l'état de la surface comme illustré à la Figure 3.

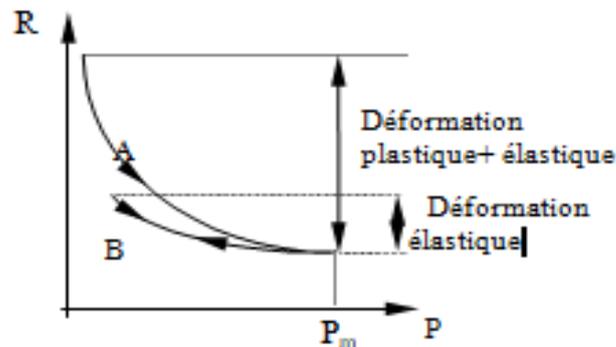


Figure II. 3. Résistance de contact en fonction de la pression mécanique. [30]

Lorsque les essais sont effectués plusieurs fois avec des pressions croissantes et décroissantes, mais inférieures à  $P_m$ , une courbe définie (courbe B) est obtenue.

Les déformations plastiques subies par les pics de rugosité dans la courbe A sont beaucoup plus élevées que les déformations élastiques.

## II.10. Influence du liquide interstitiel

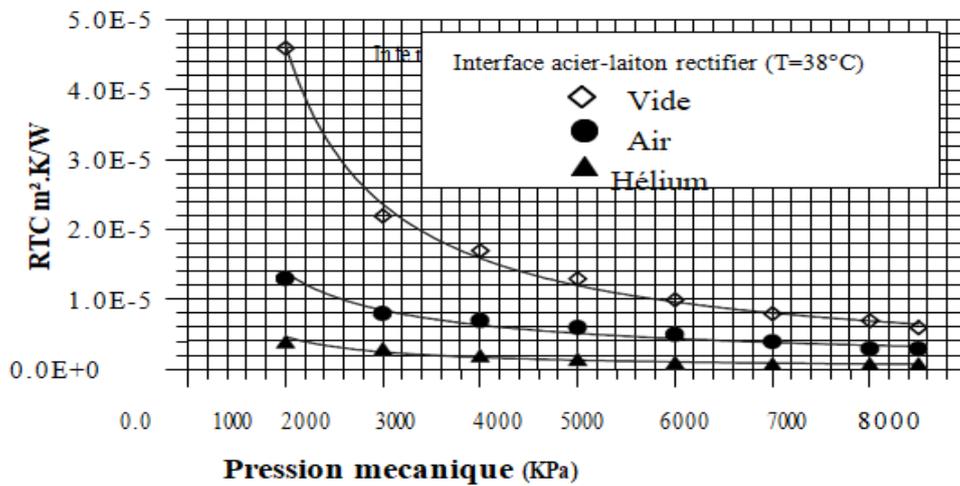
### II.10.1. Conductivité thermique du fluide interstitiel

La présence d'un fluide dans les interstices d'une interface de contact représente un chemin supplémentaire à travers lequel la chaleur peut s'écouler. Plus la conductivité thermique de ce fluide est élevée, plus la résistance thermique des contacts est faible, de sorte que les accouplements à vide

doivent avoir une grande résistance. Le fait que cette résistance ait une dépendance linéaire de la conductivité du fluide montre que l'échange thermique par convection est négligeable. (Yovanovich et Rohsenow, 1967). Et une procédure normale l'utilisation de graisses thermiques pour réduire la résistance thermique des contacts. Ces graisses, n'étant pas toutes, si elles sont bien appliquées, remplissent les espaces interstitiels, présentent un milieu plutôt conducteur, de transfert de chaleur facile. [34]

**II.10.2.Pression de fluide interstitiel**

Dans les cavités formées par les vides entre les rugosités, vous pouvez trouver un vide, un gaz, un liquide ou une graisse. La présence d'un fluide interstitiel dans les cavités des surfaces en contact modifie le RTC. Cette modification dépendra du type de fluide et de la pression à laquelle il se trouve à l'intérieur de l'interstice et de la pression mécanique de contact. Les études menées par Bardon (1972) pour différents gaz montrent qu'en général, lorsque la pression mécanique est augmentée, l'effet est de diminuer le RTC. Cet effet devient négligeable pour des pressions mécaniques très élevées. Ceci peut s'expliquer par le fait que la surface de contact solide augmente lorsque la pression mécanique est augmentée (Figure 4)



[34]

Figure II. 4. Variation quasi uniforme de la résistance de contact pour le vide, l'air et l'hélium.

Pour les pressions mécaniques faibles, la présence d'un gaz peut réduire considérablement le RTC, ce qui signifie que le transfert de chaleur se produit principalement à travers le gaz.

L'influence de la pression du gaz sur les interstices a été étudiée par Laurent (1969) qui a montré que plus elle est élevée, plus le RTC est faible (Figure 5).

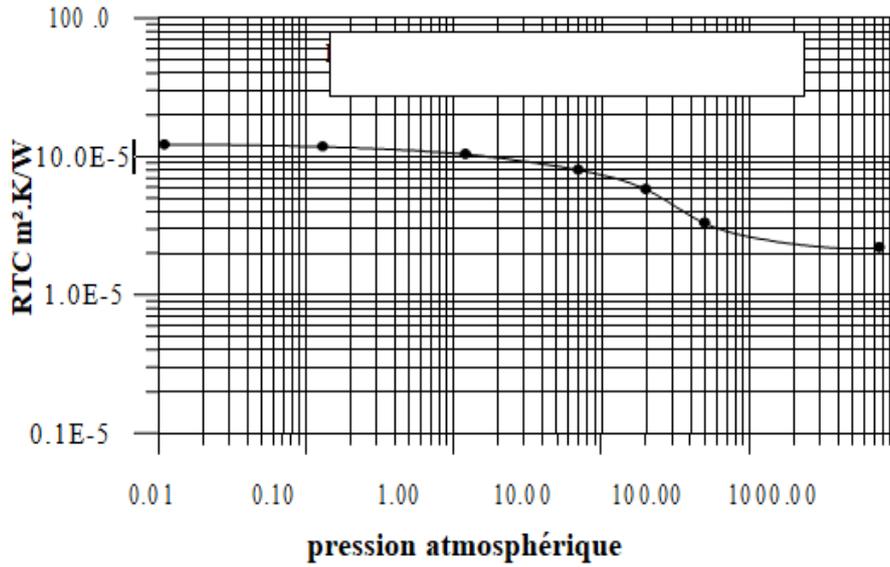


Figure II. 5 : Effet d'interstitielle de la pression du gaz [33]

Laurent (1969) a également constaté que la présence d'un liquide diminue le CCR (Figure 6).

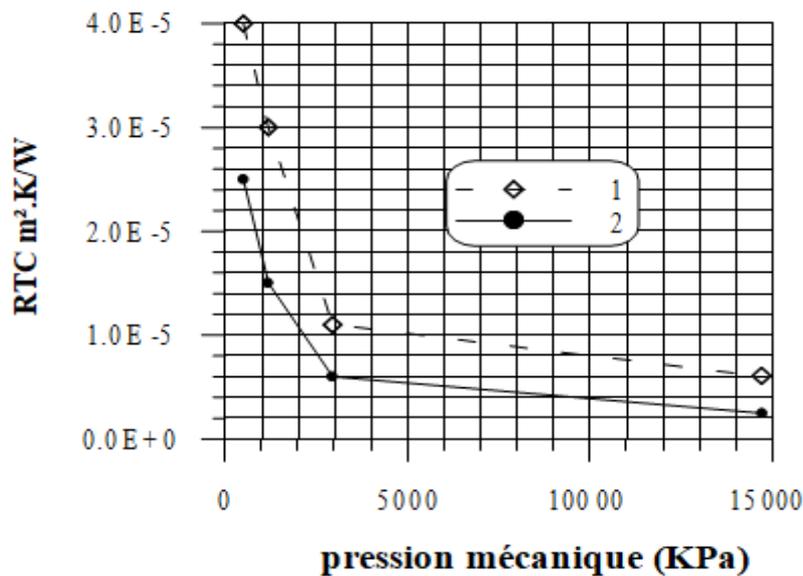


Figure II. 6 : RTC pour augmenter les charges. (1) Contact air-cuivre-cuivre. (2) contact air-cuivre-huile SISS705-cuivre. [33]

### II.11. Influence de l'oxydation de surface

La formation de couches d'oxyde sur les surfaces en contact modifie significativement le RTC. Sanokawa (1968) a montré que lorsqu'une couche d'oxyde se développe sur la surface de contact

d'un métal, le RTC augmente considérablement. Cette augmentation est attribuée au fait que l'oxyde formé a une conductivité thermique plus faible que le métal de base. [35]

### **II.12. Influence de la température d'interface**

Selon Snaith et coll. (1986), lorsque la température moyenne des surfaces en contact augmente, le RTC diminue. Pour les métaux, cet effet est principalement attribuable à la diminution de la dureté du matériau avec la température.

En présence d'un liquide interstitiel, le RTC peut augmenter ou diminuer lorsque la température d'interface augmente. Ce comportement dépendra principalement de la modification des propriétés thermo physiques du fluide. [32]

### **II.13. Influence de la direction du flux de chaleur**

Dans certains cas, le RTC est fonction de la direction du flux de chaleur à travers l'interface. Cet effet a été observé pour des matériaux identiques ou non et n'a pas encore d'explication satisfaisante. Selon Stevenson et coll. (1991), cet effet dépend des caractéristiques de surface et des propriétés des matériaux en contact 1. [36]

### **II.14. Influence de la topographie (la rugosité) de la surface**

La rugosité est l'ensemble des déviations micro géométriques, caractérisées par de petites protubérances et indentations présentes sur une surface. Il joue un rôle important dans le comportement des composants mécaniques.

L'instrument utilisé pour mesurer la rugosité d'une surface est appelé rugosimètre et joue le rôle de vérifier la surface des pièces et des outils, comme un moyen de créer une évaluation de la rugosité. Il assure un haut niveau de qualité dans les mesures et est également destiné à l'analyse des problèmes liés à la rugosité de surface. [32,33]

### **II.15. Les compteurs de rugosité**

Les appareils qui fournissent uniquement la lecture des paramètres de rugosité (qui peuvent être à la fois analogiques et numériques)

Appareil qui, en plus de la lecture, permet l'enregistrement, sur papier, du profil de surface effectif

Les premiers sont les plus utilisés dans les lignes de produits, puisque les seconds sont plus utilisés dans les laboratoires, ils présentent également un graphique important pour une analyse plus approfondie de la texture de la surface

Il est très difficile d'évaluer les effets de la topographie de surface sur la valeur RTC. Selon Snaith et coll. (1986), lorsque les surfaces sont plus lisses ou si elles ont de petites rugosités, le contact sera meilleur et le RTC diminuera.

Aucune surface n'est parfaitement plane. Ils présentent toujours des ondulations qui, selon Laurent (1969), ont en général un effet plus important sur la valeur du RTC que sur la rugosité. Des études du même auteur montrent également que l'augmentation de la pression mécanique ne modifie pratiquement pas la rugosité des surfaces en contact, tandis que le RTC est fortement affecté.

L'effet de la rugosité sur la résistance thermique est fondamental. Importance. La rugosité détermine le degré de finition de surface et, par conséquent, le nombre de points en contact lorsque deux surfaces sont couplées.

Plus la rugosité est élevée, plus la résistance est élevée, car plus les surfaces sont rugueuses, plus la difficulté d'obtenir un contact physique est grande et plus la surface est grande (le fluide interstitiel a une conductivité thermique inférieure à celle du matériau sur les surfaces en contact.). Des interstices. On entend par surface lisse une surface dont la rugosité est très faible, car elle ne peut être éliminée, même pas par le procédé de finition de surface le plus sophistiqué. Au fur et à mesure que la pression superficielle des surfaces augmente, l'effet de rugosité diminue ; ceci est particulièrement vrai pour les surfaces très rugueuses. [32,33]

## **II.16. Conclusion**

Après avoir analysé ces facteurs qui influencent la résistance des contacts, on peut conclure que la construction d'un modèle physico-mathématique capable de décrire le phénomène dans sa globalité est, en pratique, irréalisable. Il existe plusieurs modèles approximatifs, mais tous prennent en compte l'influence de quelques facteurs seulement, en gardant les autres constants. Chacun de ces modèles ne peut être appliqué qu'à certaines situations, il est donc nécessaire de connaître en profondeur le contact considéré pour choisir la formulation la plus adaptée, afin d'obtenir une bonne estimation de la valeur de la résistance thermique. En raison de la complexité des facteurs qui affectent cette résistance, on s'attend à ce que des résultats plus concrets soient obtenus par une analyse expérimentale, où les contacts d'intérêt sont simulés et la résistance mesurée directement.

# Chapitre III

Étude analytique.

### III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier analytiquement le transfert de chaleur entre deux solides en contact. On sait que la surface de transfert de chaleur réelle entre deux matériaux solides en contact représente 10% contact direct de la surface globale, ce qui est dû à plusieurs causes, dont la plus importante est la rugosité et 90% de la surface globale qui reste représente qu'il n'y a pas de contact direct matière 1 et matière 2 et le transfert thermique passe par une matière interstitielle (fluide).

### III.2.Modèle analytique

Dans notre étude, nous allons utiliser la méthode analytique pour résoudre le problème, et pour des raisons de simplification, nous considérons que : Les aspérités sont de forme carrée

La surface de contact réelle est de 10% de la surface totale (Où le transfert de chaleur se fait par conduction entre matière 1 et matière 2) et 90% de la surface global IL n'y a pas de contact direct matière 1 et matière 2 et le transfert thermique passe par une matière interstitielle (fluide)

Nous négligeons le mouvement du fluide, donc il n'y a pas de transfert de chaleur par convection.

### III.3.Bilan thermique

Un contact réel entre deux matériaux différents contient un contact direct, et un contact indirect séparés par une matière interstitielle qui représente par (figure III.1) et pour simplifier ce contact nous prélevons un élément de (figure III.1) représentant par (figure III.2).

On donne :

Le flux de chaleur de contact direct est  $q'$  et le flux de chaleur de contact indirect est  $q''$ .

Les conductivités thermiques du matériau sont  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  et la conductivité thermique de matériau interstitiel est  $\lambda_f$ .

Les températures des matériaux sont  $T_1'$  et  $T_2'$ , la température de la surface de contact direct est  $T_i$  et la température de matériau interstitiel est  $T_2$ .

Les surfaces du matériau est  $S_c$  et la surface de matériau interstitiel est  $S_v$ .

La rugosité de surface de contact est  $R_a$ .

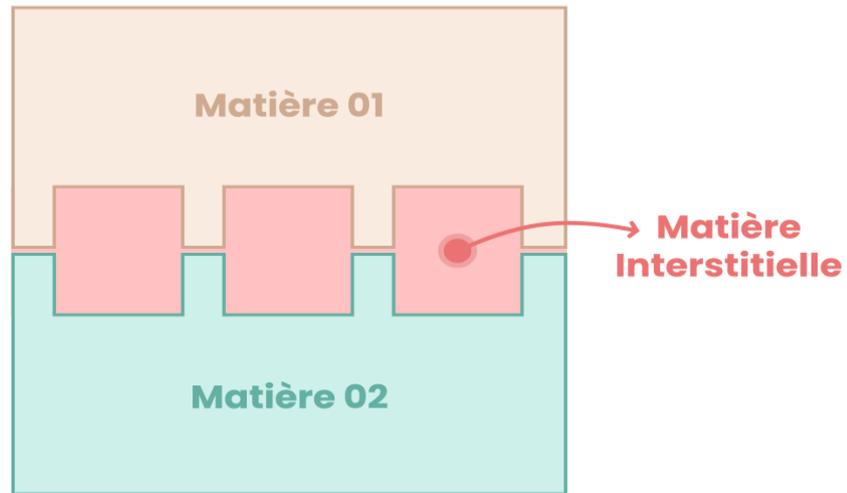


Figure III.1: Schéma de la surface de contact entre deux matériaux différents en contact réel.

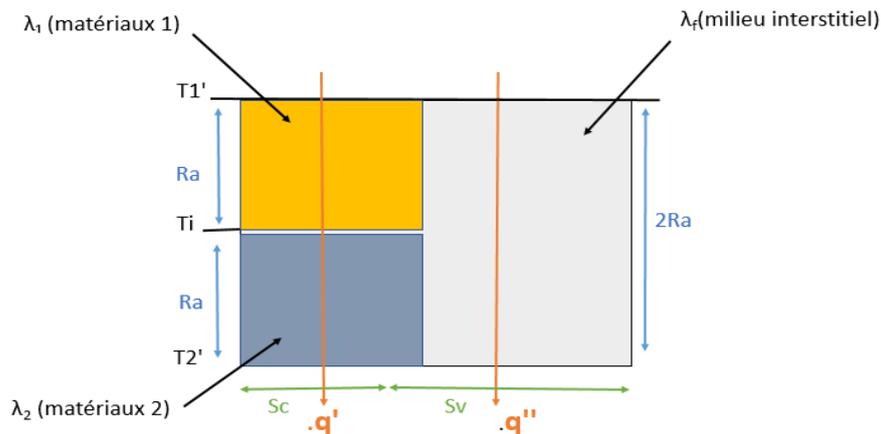


Figure III.2: Schéma de la distribution de flux unidirectionnel à travers les surfaces de contact réel.

Selon la loi de Fourier de conduction, le flux de chaleur  $q$  dans la zone de transition peut être défini par la somme de deux flux de chaleur, qui défini par  $q'$  et l'autre par le milieu interstitiel qui est défini par  $q''$ ,

On peut écrire alors :

$$q = q' + q'' \tag{III.1}$$

$$q = \frac{T_1' - T_2'}{RTC} \quad (\text{III.2})$$

D'après l'équation III.1 et l'équation III.2 :

$$q' = \lambda_1 \times S_c \times \frac{T_1' - T_i}{Ra} \quad (\text{III.3})$$

$$q' = \lambda_2 \times S_c \times \frac{T_i - T_2'}{Ra} \quad (\text{III.4})$$

$$q' \times \left( \frac{Ra}{\lambda_1 \times S_c} \right) = T_1' - T_i \quad (\text{III.5})$$

$$q' \times \left( \frac{Ra}{\lambda_2 \times S_c} \right) = T_i - T_2' \quad (\text{III.6})$$

$$q' \times \left( \frac{Ra}{\lambda_1 \times S_c} + \frac{Ra}{\lambda_2 \times S_c} \right) = T_1' - T_2' \quad (\text{III.7})$$

$$q' = \frac{T_1' - T_2'}{\frac{Ra}{\lambda_1 \times S_c} + \frac{Ra}{\lambda_2 \times S_c}} \quad (\text{III.8})$$

D'autre part, nous avons

$$q'' = \lambda_f \times S_v \times \frac{T_1' - T_2}{2Ra} \quad (\text{III.9})$$

$$\frac{T_1' - T_2'}{RTC} = \frac{T_1' - T_2'}{\frac{Ra}{\lambda_1 \times S_c} + \frac{Ra}{\lambda_2 \times S_c}} + \lambda_f \times S_v \times \frac{T_1' - T_2}{2Ra} \quad (\text{III.10})$$

$$\frac{1}{RTC} = \frac{1}{\frac{Ra}{\lambda_1 \times S_c} + \frac{Ra}{\lambda_2 \times S_c}} + \frac{\lambda_f \times S_v}{2Ra} \quad (\text{III.11})$$

$$\frac{1}{RTC} = \frac{1}{Ra} \left[ \left( \frac{1}{\frac{Ra}{\lambda_1 \times S_c} + \frac{Ra}{\lambda_2 \times S_c}} \right) + \frac{\lambda_f \times S_v}{2} \right] \quad (\text{III.12})$$

$$\frac{1}{RTC} = \frac{1}{Ra} \left( \frac{1}{\frac{\lambda_2 \times S_c + \lambda_1 \times S_c}{\lambda_1 \times \lambda_2 \times S_c^2}} + \frac{\lambda_f \times S_v}{2} \right) \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{1}{RTC} = \frac{1}{Ra} \left( \frac{\lambda_1 \times \lambda_2 \times S_c}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{\lambda_f \times S_v}{2} \right) \quad (\text{III.14})$$

$$RTC = \frac{Ra}{\frac{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{\lambda f \times Sv}{2}} \tag{III.15}$$

Eq (III.15) est l'équation de résistance thermique de contact RTC.

L'équation (III.15) peut-être obtenue par la méthode des schémas électriques équivalents :

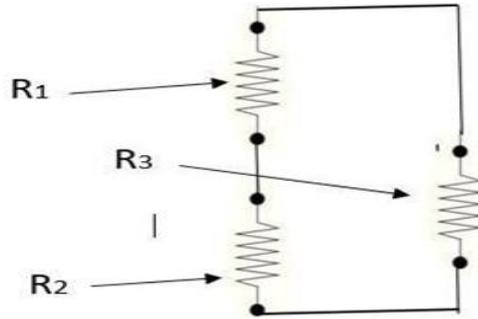


Figure III.3 : Schémas électrique équivalent.

On a :

$$Ra = R1 = R2 = 1/2(R3).$$

Donc

$$\frac{Ra}{\lambda_1 \times Sc} = \frac{R1}{\lambda_2 \times Sc} \tag{III.16}$$

$$\frac{Ra}{\lambda_2 \times Sc} = \frac{R2}{\lambda_2 \times Sc} = \frac{R1}{\lambda_2 \times Sc} \tag{III.17}$$

$$\frac{2Ra}{\lambda f \times Sv} = \frac{R3}{\lambda f \times Sv} = \frac{2R1}{\lambda f \times Sv} \tag{III.18}$$

$$Req = \frac{1}{\frac{1}{\frac{R1}{\lambda_1 \times Sc} + \frac{R1}{\lambda_2 \times Sc}} + \frac{1}{\frac{2R1}{\lambda f \times Sv}}} \tag{III.19}$$

$$R_{tot} = Req = \frac{\left( \frac{R1}{\lambda_1 \times Sc} + \frac{R1}{\lambda_2 \times Sc} \right) * \frac{2R1}{\lambda f \times Sv}}{\frac{R1}{\lambda_1 \times Sc} + \frac{R1}{\lambda_2 \times Sc} + \frac{2R1}{\lambda f \times Sv}} \tag{III.20}$$

$$R_{tot} = \frac{\left(\frac{R_1\lambda_2Sc + R_1\lambda_1Sc}{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc^2}\right) * \frac{2R_1}{\lambda f \times Sv}}{\frac{R_1\lambda_2 + R_1\lambda_1}{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc^2} + \frac{2R_1}{\lambda f \times Sv}} \quad (\text{III.21})$$

$$R_{tot} = \frac{\left(\frac{2R_1^2(\lambda_2Sc + \lambda_1Sc)}{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc^2 \times \lambda f \times Sv}\right)}{\frac{(R_1\lambda_2 + R_1\lambda_1)(\lambda f \times Sv) + 2R_1(\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc^2)}{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc^2 \times \lambda f \times Sv}} \quad (\text{III.22})$$

$$R_{tot} = \frac{\left(\frac{2R_1^2(\lambda_2Sc + \lambda_1Sc)}{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc^2 \times \lambda f \times Sv}\right)}{\frac{(R_1\lambda_2 + R_1\lambda_1)(\lambda f \times Sv) + 2R_1(\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc)}{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc^2 \times \lambda f \times Sv}} \quad (\text{III.23})$$

$$R_{tot} = \frac{2R_1(\lambda_2 + \lambda_1)}{(\lambda_2 + \lambda_1)(\lambda f \times Sv) + 2(\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc)} \quad (\text{III.24})$$

$$R_{tot} = \frac{R_1}{\frac{\lambda f \times Sv}{2} + \frac{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc}{\lambda_2 + \lambda_1}} \quad (\text{III.25})$$

$$R_{tot} = \frac{R_1}{\frac{\lambda f \times Sv}{2} + \frac{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc}{\lambda_2 + \lambda_1}} \quad (\text{III.26})$$

$$q = \frac{(T_1' - T_2')}{R_{tot}} = \frac{(T_1' - T_2')}{\frac{R_1}{\frac{\lambda f \times Sv}{2} + \frac{\lambda_1 \times \lambda_2 \times Sc}{\lambda_2 + \lambda_1}}} \quad (\text{III.27})$$

### III.3. Conclusion

Grâce à cette étude analytique de l'amélioration de transfert thermique entre deux matériaux en contact rugueux, nous démontrâmes l'équation de la résistance thermique de contact RTC.

Chapitre IV :

Résultats et discussions

## IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons proposer des valeurs pour la conductivité thermique de six couples des matériaux en contact pour calculer RTC à partir l'équation analytique précédente et traduire les résultats en courbes graphiques, et c'est pour une étude de l'impact de la rugosité Ra et l'impact de la conductivité thermique du milieu interstitiel sur la résistance thermique de contact.

## IV.2.Résultats et discussion

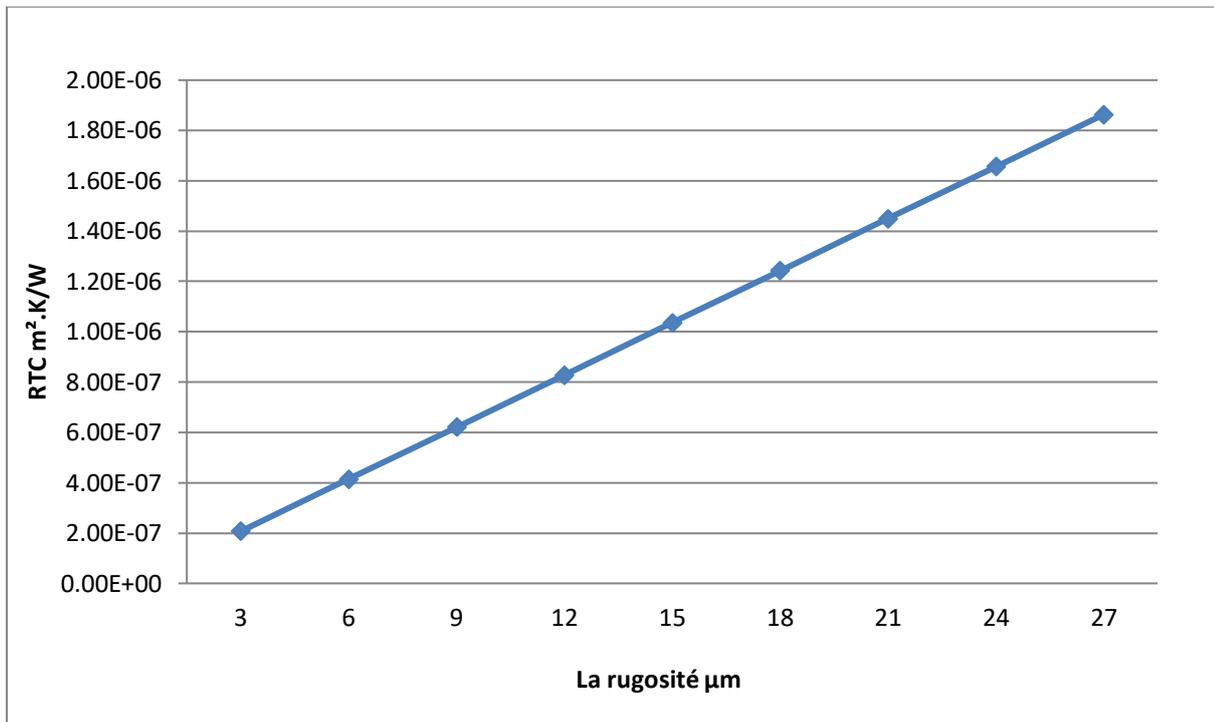
### IV.2.1.Étude de l'impact de la rugosité sur le RTC

Dans le but d'étudier l'impact de la rugosité sur le RTC, d'après l'équation analytique précédente, la RTC varie linéairement en fonction de la rugosité ; La RTC a été calculée pour six couples des conductivités thermiques: ( $\lambda_1=300$  W/m.K et  $\lambda_2 = 220$  W/m.K), ( $\lambda_1=250$  W/m.K et  $\lambda_2 = 180$  W/m.K), ( $\lambda_1=100$  W/m.K et  $\lambda_2 = 60$  W/m.K), ( $\lambda_1=70$  W/m.K et  $\lambda_2 = 50$  W/m.K), ( $\lambda_1=25$ W/m.K et  $\lambda_2 = 10$  W/m.K) et ( $\lambda_1=20$  W/m.K et  $\lambda_2 = 8$  W/m.K).

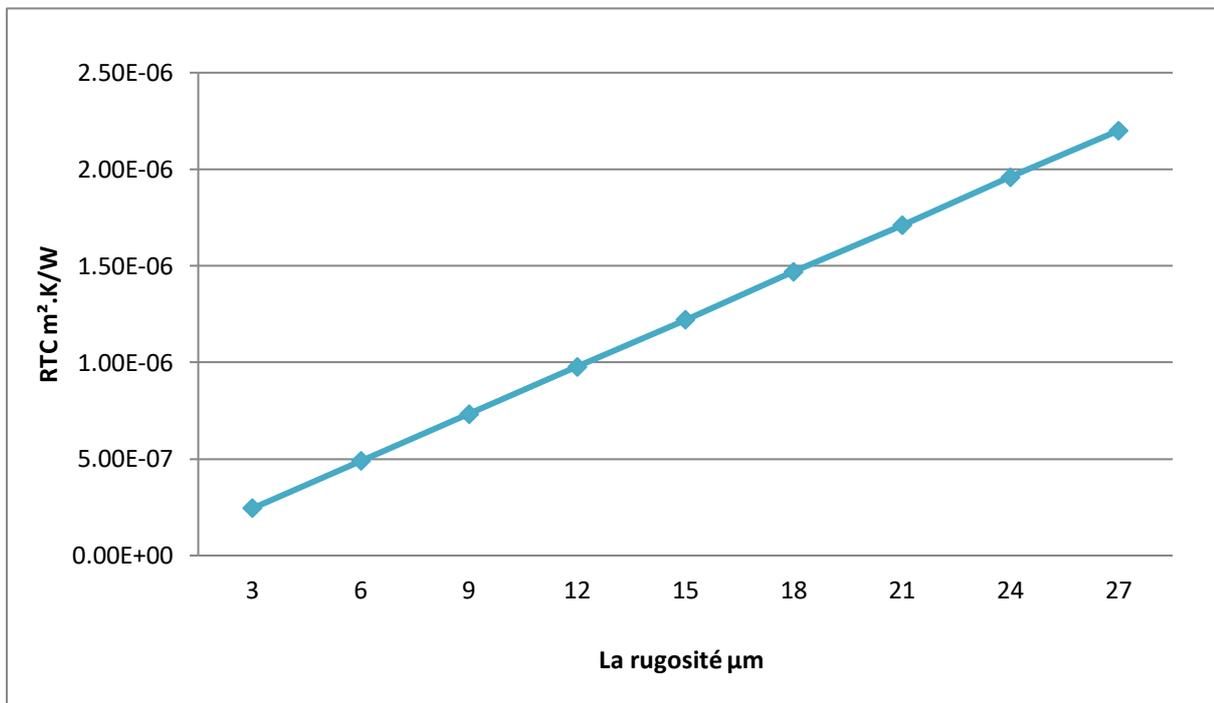
La rugosité Ra varie entre 3 et 27  $\mu\text{m}$ , les résultats obtenus sont validés analytiquement par le modèle proposé et présentés dans les courbes suivants : IV .1, IV .2, IV .3, et IV .4.

Les figures IV .1, IV .2, IV .3 et IV .4 montre que le RTC augmente avec l'augmentation de la rugosité, et son augmentation est élevée dans les couples ( $\lambda_1=25$ W/m.K et  $\lambda_2 = 10$  W/m.K) et ( $\lambda_1=20$  W/m.K et  $\lambda_2 = 8$  W/m.K), et moins de ça dans les couple ( $\lambda_1=100$  W/m.K et  $\lambda_2 = 60$  W/m.K) et ( $\lambda_1=70$  W/m.K et  $\lambda_2 = 50$  W/m.K) et faible dans les couples ( $\lambda_1=300$  W/m.K et  $\lambda_2 = 220$  W/m.K) et ( $\lambda_1=250$  W/m.K et  $\lambda_2 = 180$  W/m.K).

La figure III.4 montre en général que la RTC augmente avec l'augmentation de la rugosité et on remarque bien que la RTC est fortement influencée par la conductivité thermique des solides en contact, en particulier dans le cas des solides en contact de faible conductivité thermique.

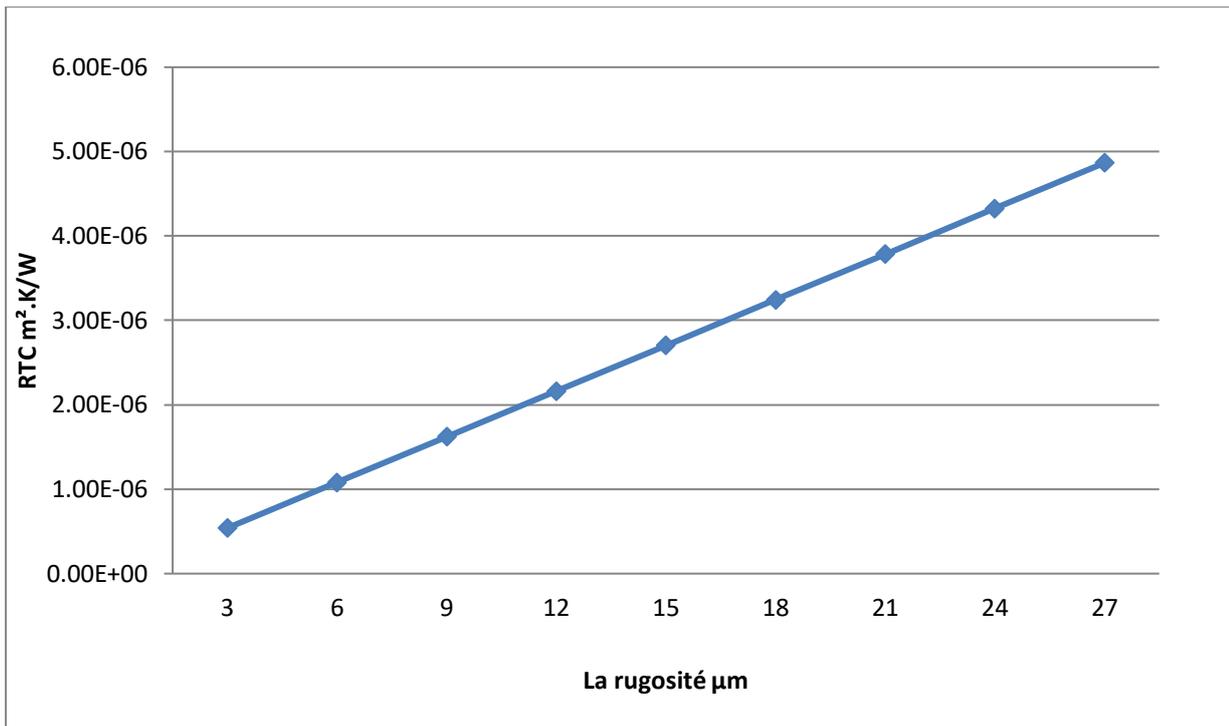


(a)

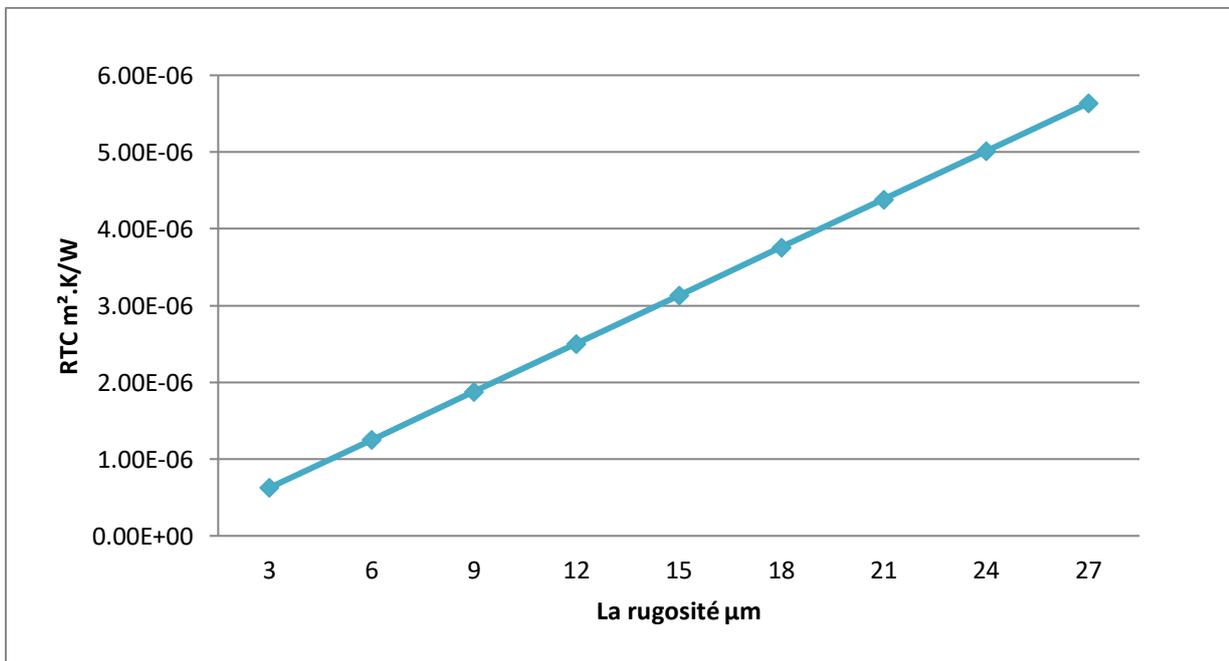


(b)

Figure IV.1: Variation de RTC en fonction de la rugosité avec conductivité thermique a) :  $\lambda_1=300$  W/m.K et  $\lambda_2 = 220$  W/m.K, b) :  $\lambda_1=250$  W/m.K et  $\lambda_2 = 180$  W/m.K.

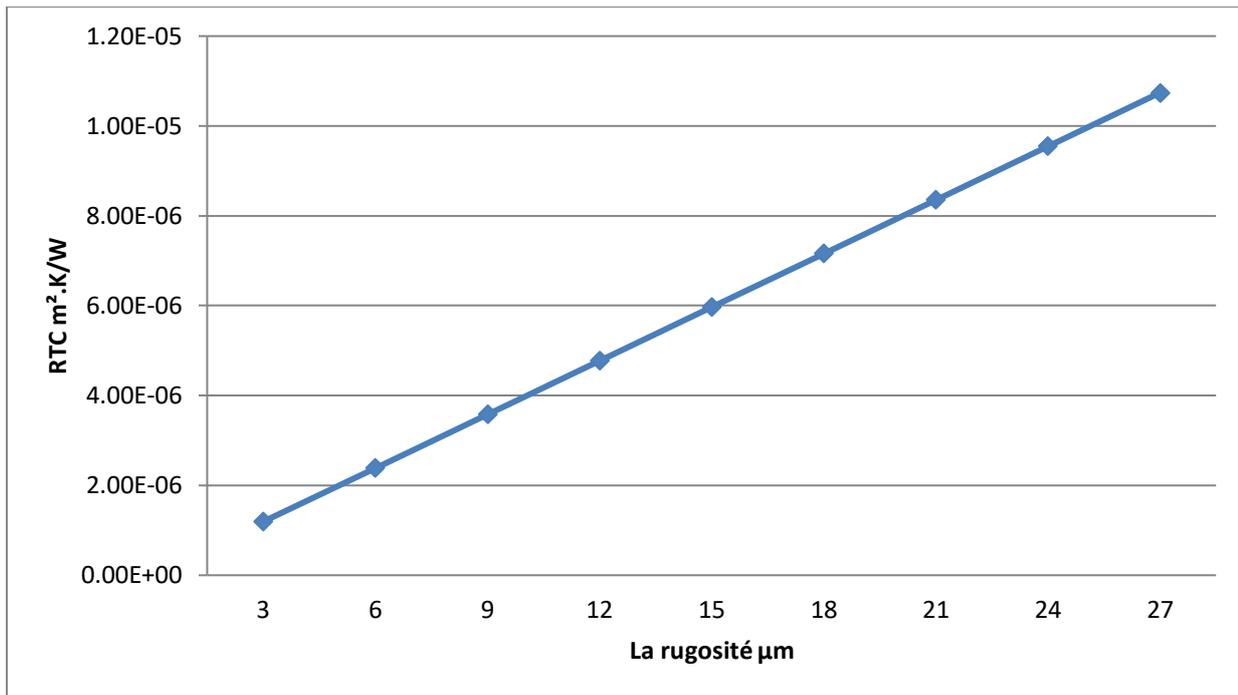


(a)

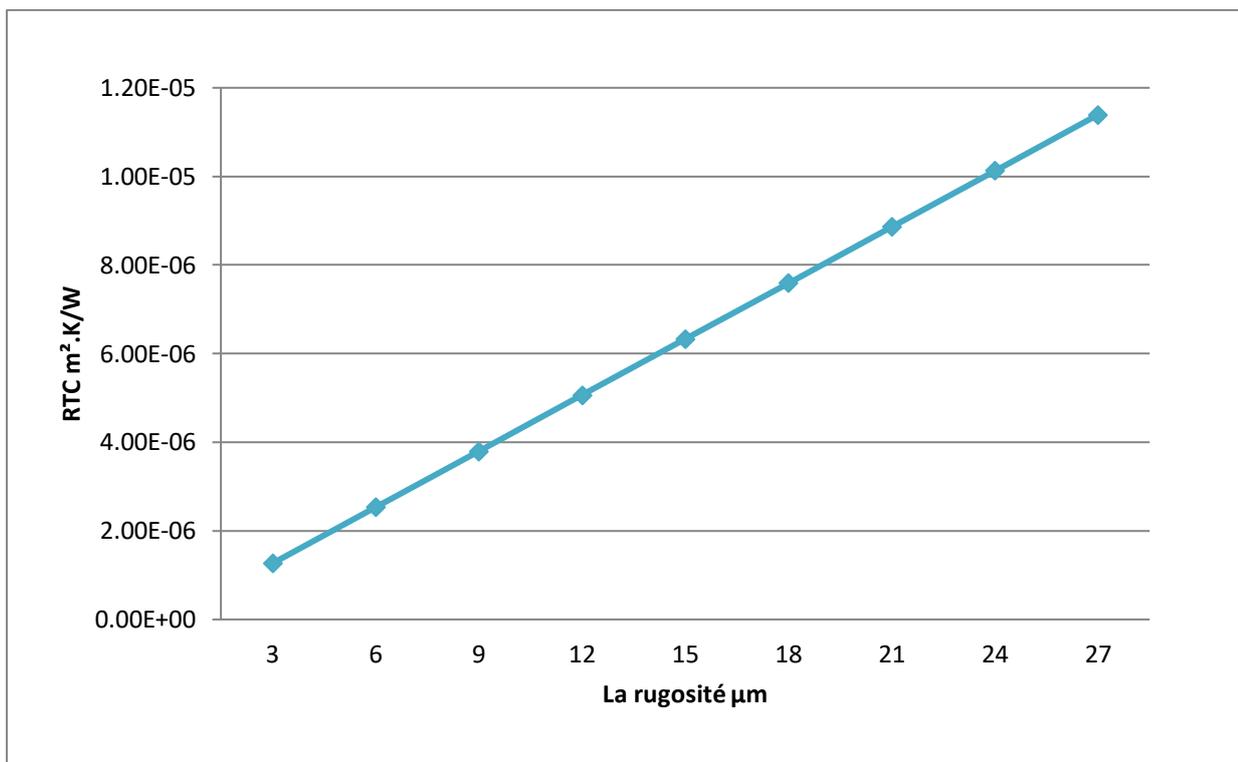


(b)

Figure IV.2 : Variation de RTC en fonction de la rugosité avec conductivité thermique a)  $\lambda_1=100$  W/m.K et  $\lambda_2 = 60$  W/m.K, b)  $\lambda_1=70$  W/m.K et  $\lambda_2 = 50$  W/m.K.



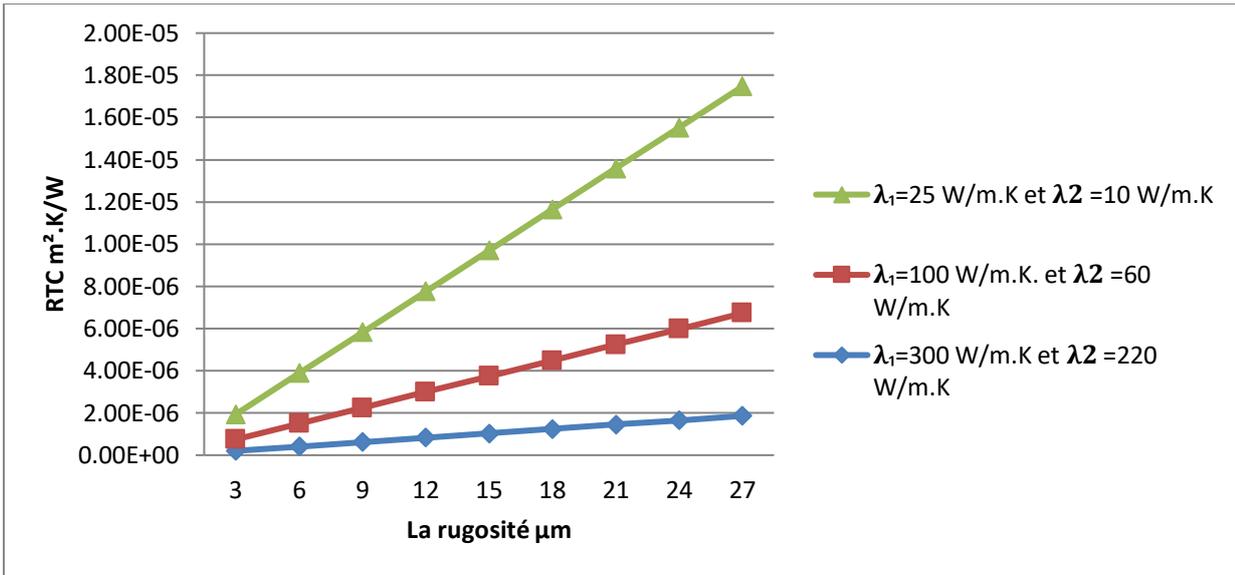
(a)



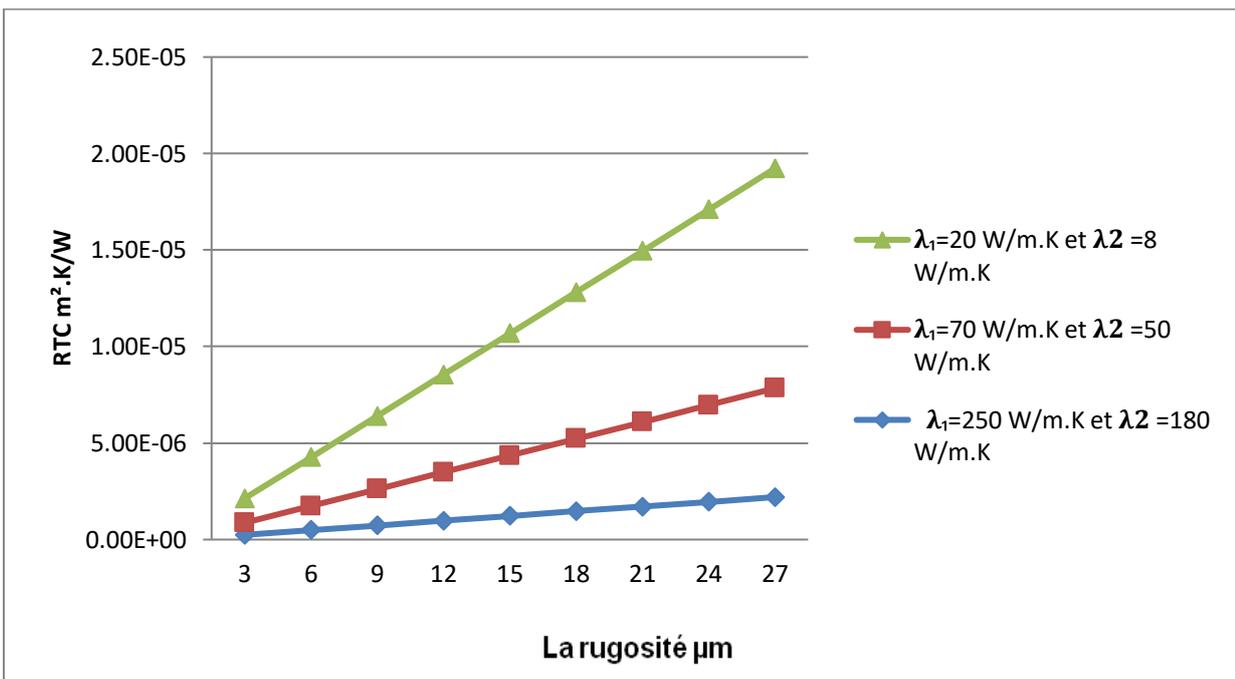
(b)

Figure IV.3 : variation de RTC en fonction de la rugosité avec conductivité thermique

a) :  $\lambda_1=25\text{W/m.K}$  et  $\lambda_2 = 10 \text{ W/m.K}$ , b) :  $\lambda_1=20 \text{ W/m.K}$  et  $\lambda_2 = 8 \text{ W/m.K}$ .



(a)



(b)

Figure IV.4 : variation de RTC en fonction de la rugosité avec conductivité thermique des six couples. a) :  $\lambda_1=300$  W/m.K et  $\lambda_2=220$  W/m.K,  $\lambda_1=100$  W/m.K et  $\lambda_2=60$  W/m.K et  $\lambda_1=25$  W/m.K et  $\lambda_2=10$  W/m.K, b) :  $\lambda_1=250$  W/m.K et  $\lambda_2=180$  W/m.K,  $\lambda_1=70$  W/m.K et  $\lambda_2=50$  W/m.K et  $\lambda_1=20$  W/m.K et  $\lambda_2=8$  W/m.K.

### IV.2.2. Étude de l'impact de la conductivité thermique de milieu interstitiel sur le RTC

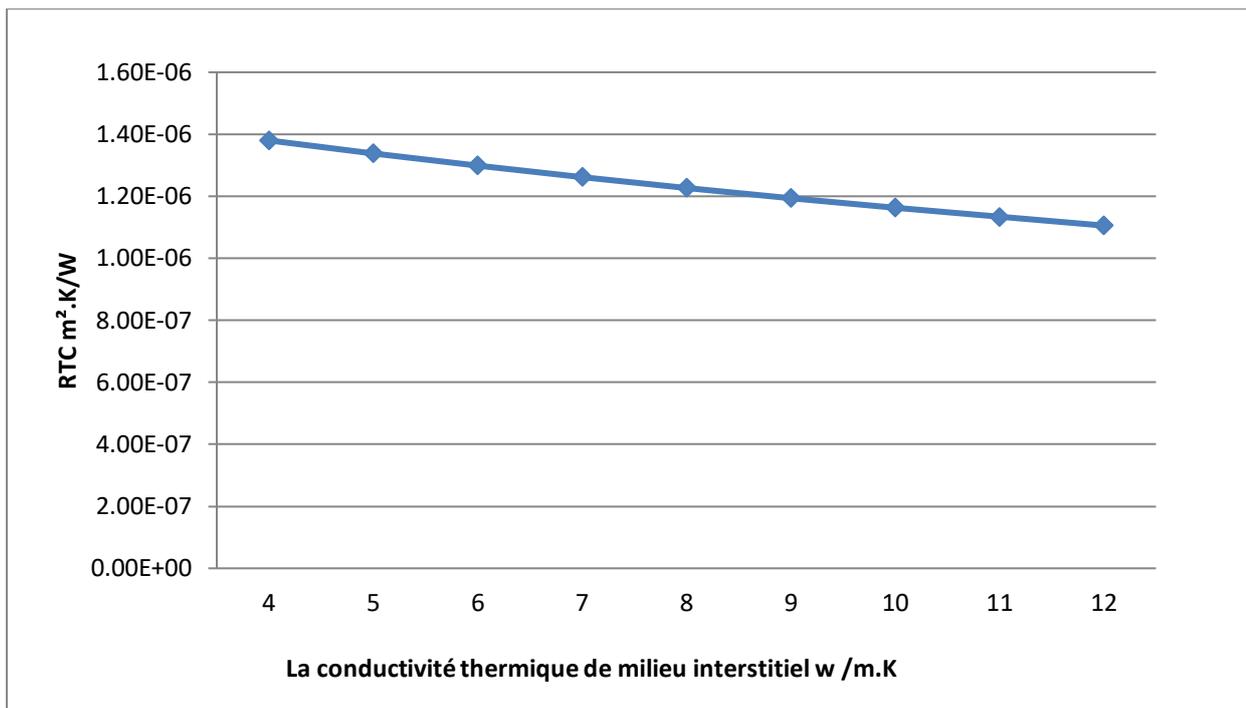
L'étude présentée dans cette partie est un calcul de RTC en fonction de la conductivité thermique de milieu interstitiel, la d'après l'équation analytique précédente, RTC varie selon la fonction inverse en fonction de la conductivité thermique de milieu interstitiel, ce qui est présenté à la figure IV.5, IV.6, IV.7 et IV.8

Les conductivités thermiques de fluide interstitiel  $\lambda_f$  varie entre 4 w/m.K et 12w/m.K,

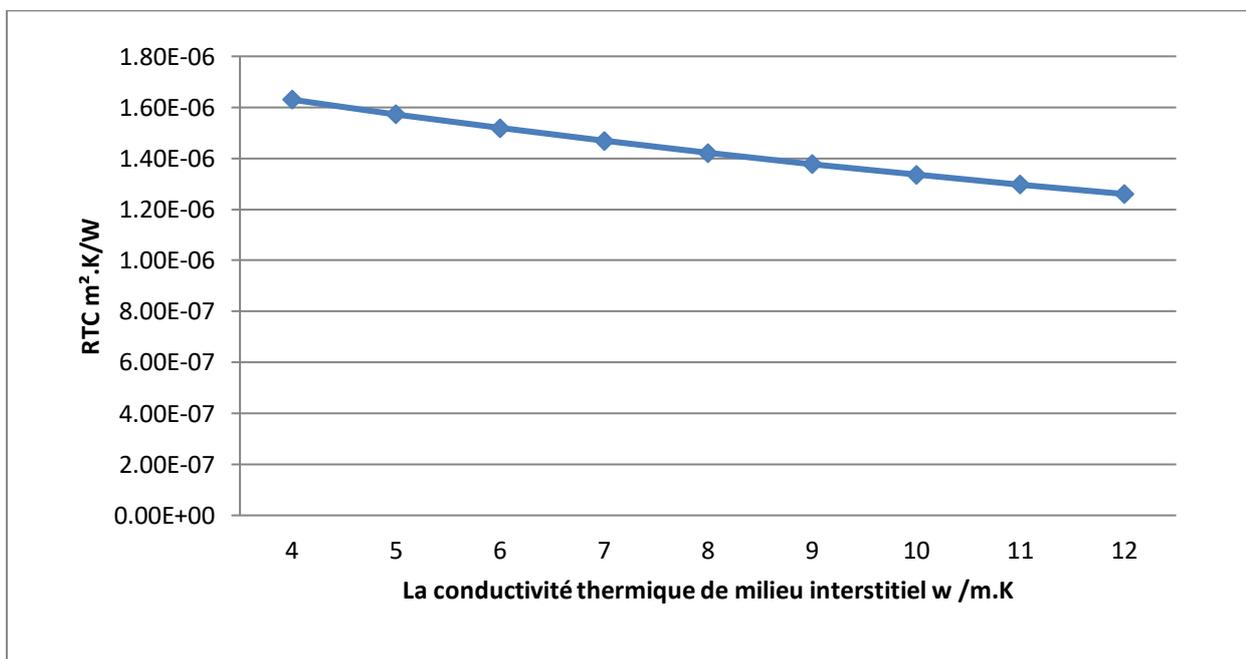
Les figures IV.5, IV.6, IV.7 et IV.8 montres que la conductivité thermique de milieu interstitiel influe significativement sur la résistance thermique de contact qui atteint son minimum dans le cas du contact entre les matériaux de grandes conductivités thermiques lorsque la conductivité thermique de milieu interstitiel est bonne.

Les figures IV.5, IV.6, IV.7 et IV.8 montres clairement que l'augmentation de la conductivité thermique de milieu interstitiel diminue la résistance thermique de contact, et leur diminution est considérablement dans le cas de contact des matériaux de grandes conductivités thermiques.

Figure IV.8 montrent en général que la RTC diminue avec l'augmentation de la conductivité thermique de milieu interstitiel et son diminution est significative si la conductivité thermique de milieu interstitiel élevé.

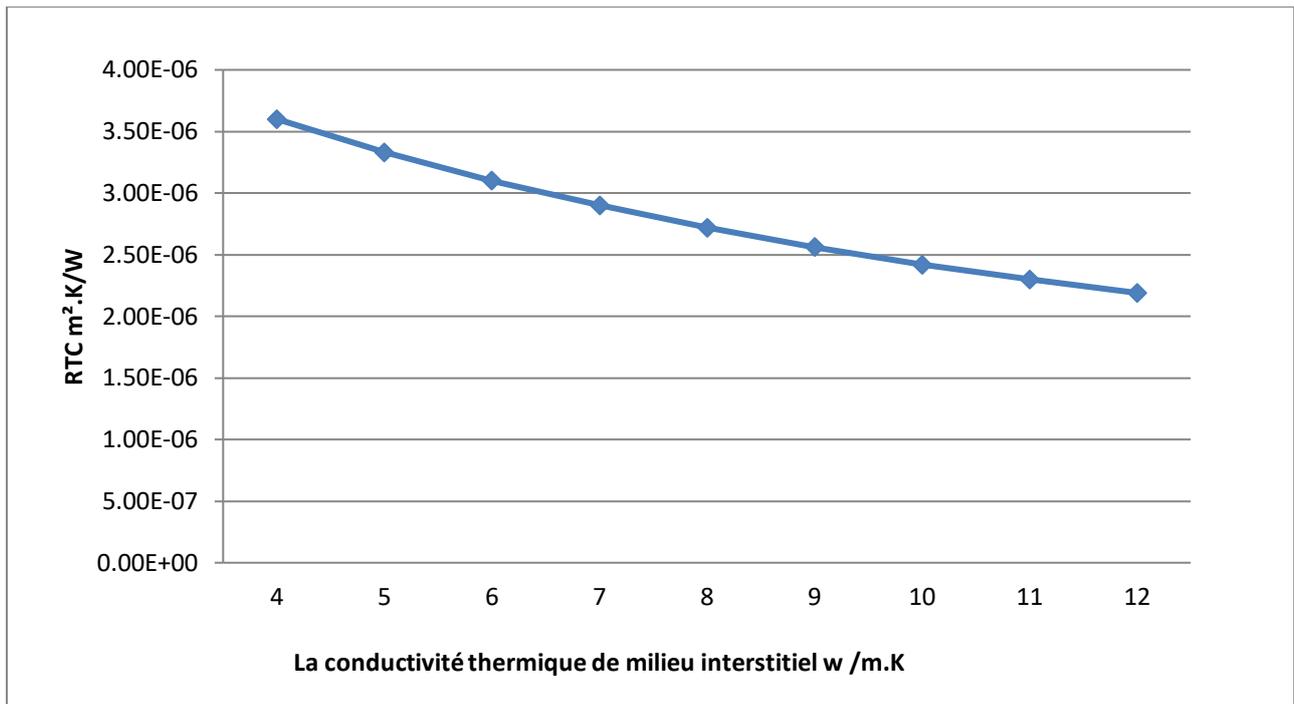


(a)

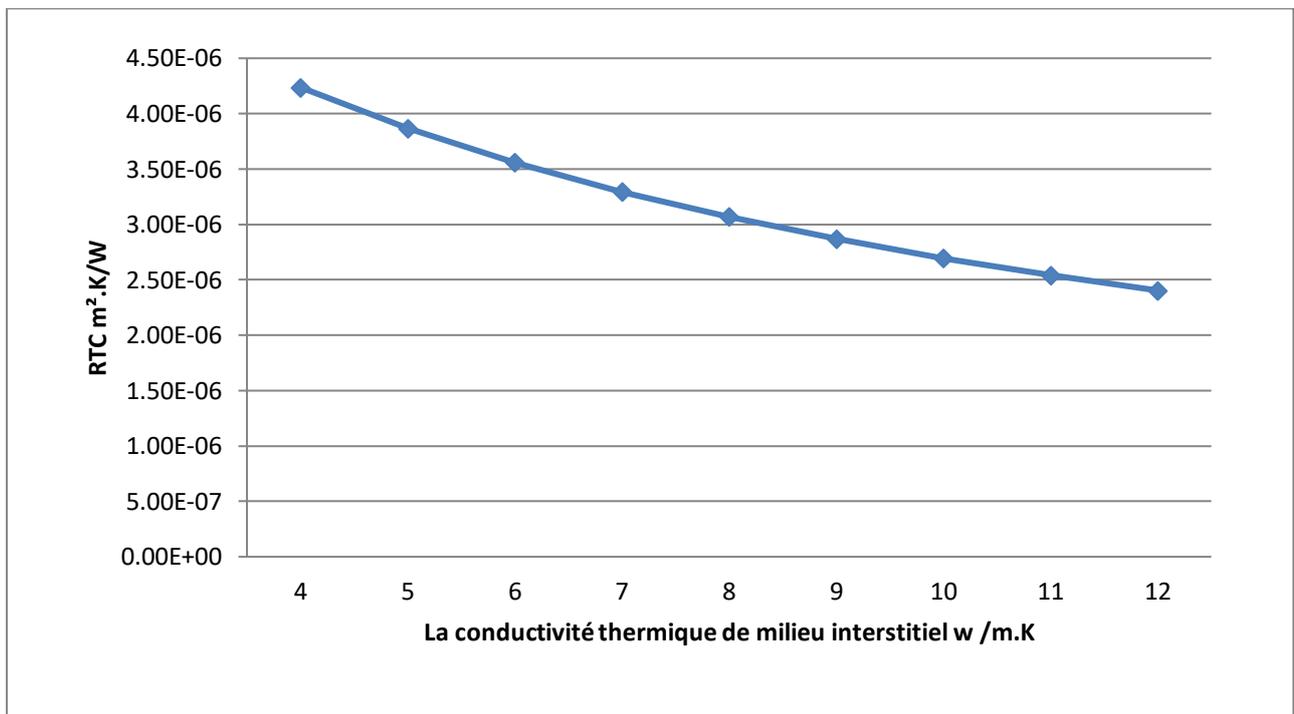


(b)

Figure IV.5 : variation de RTC en fonction de milieu interstitiel avec des conductivités thermiques a) :  $\lambda_1=300$  w /m.K et  $\lambda_2 =220$  w /m.K, b) :  $\lambda_1=250$  w /m.K et  $\lambda_2 =180$  w /m.K.

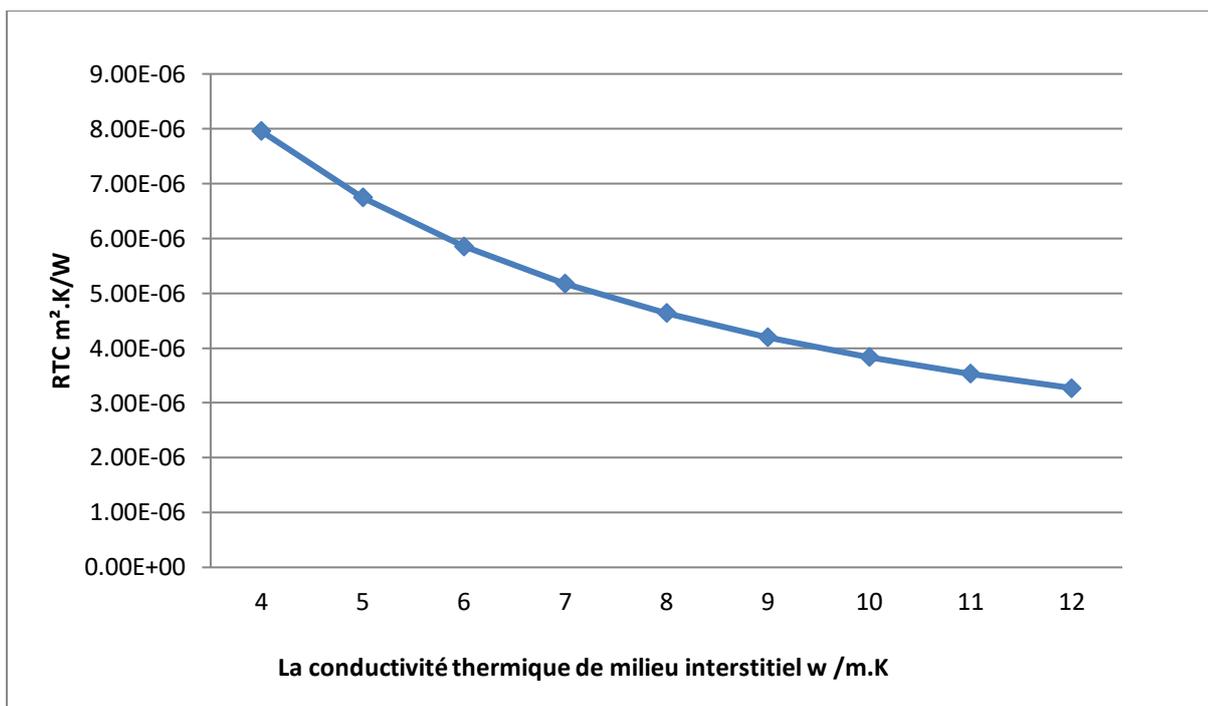


(a)

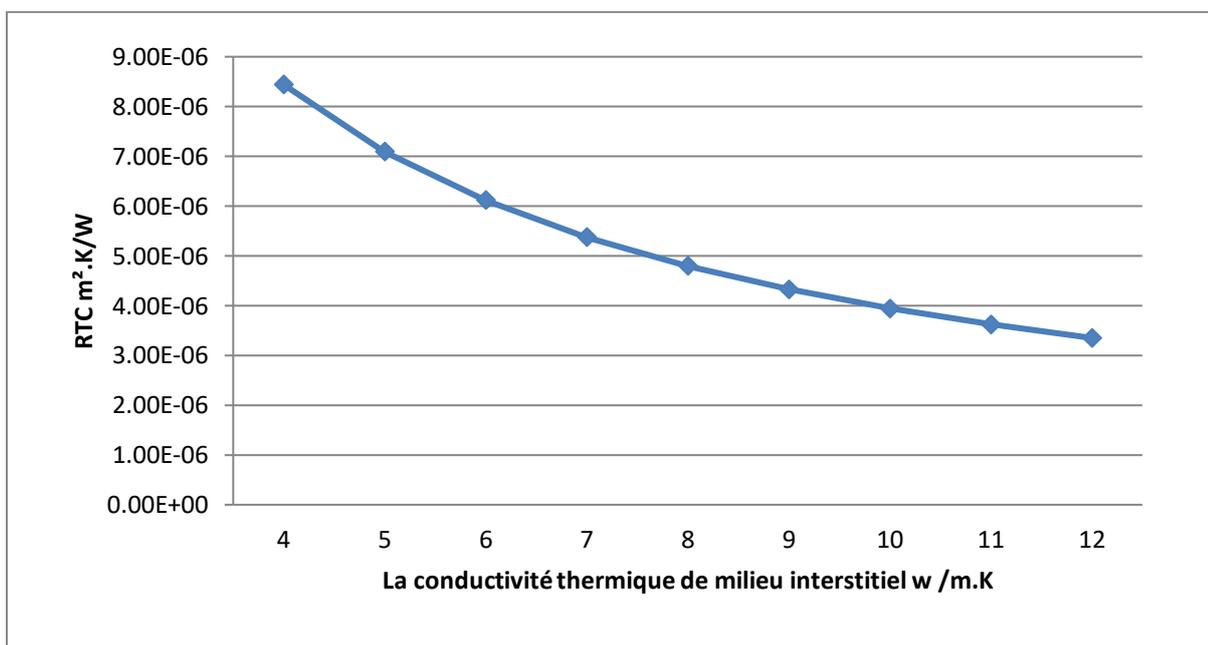


(b)

Figure IV.6 : variation de RTC en fonction de milieu interstitiel avec des conductivités thermiques a) : $\lambda_1=100$  w /m.K et  $\lambda_2 =60$  w /m.K, b) : $\lambda_1=70$ w /m.K et  $\lambda_2 =50$ w /m.K.



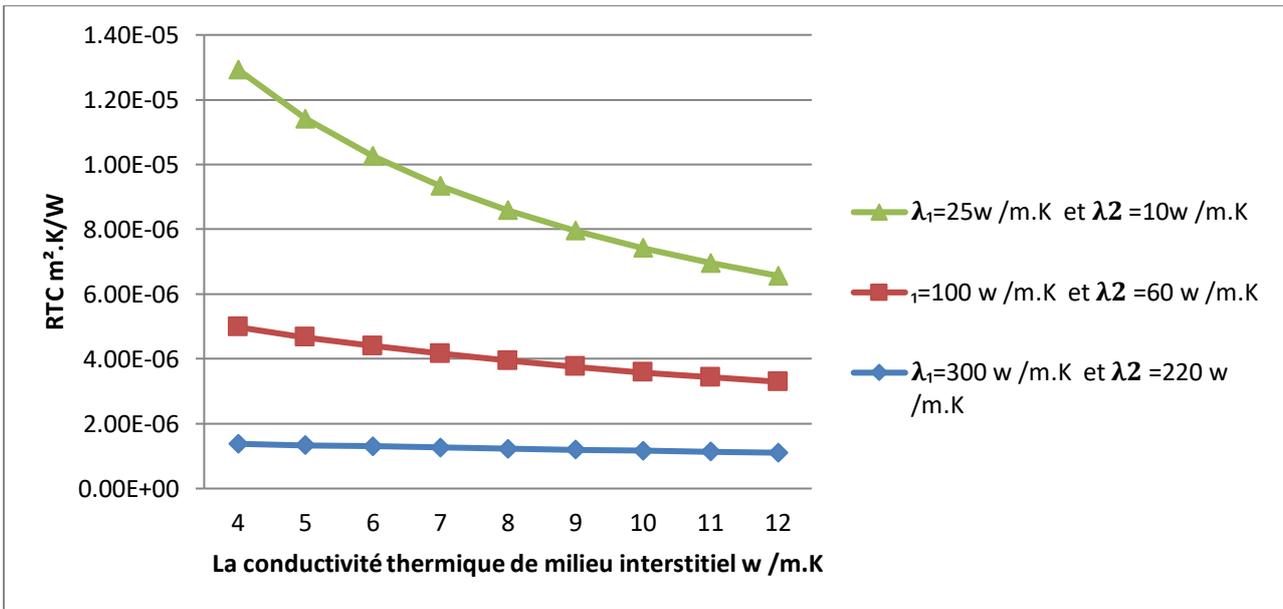
(a)



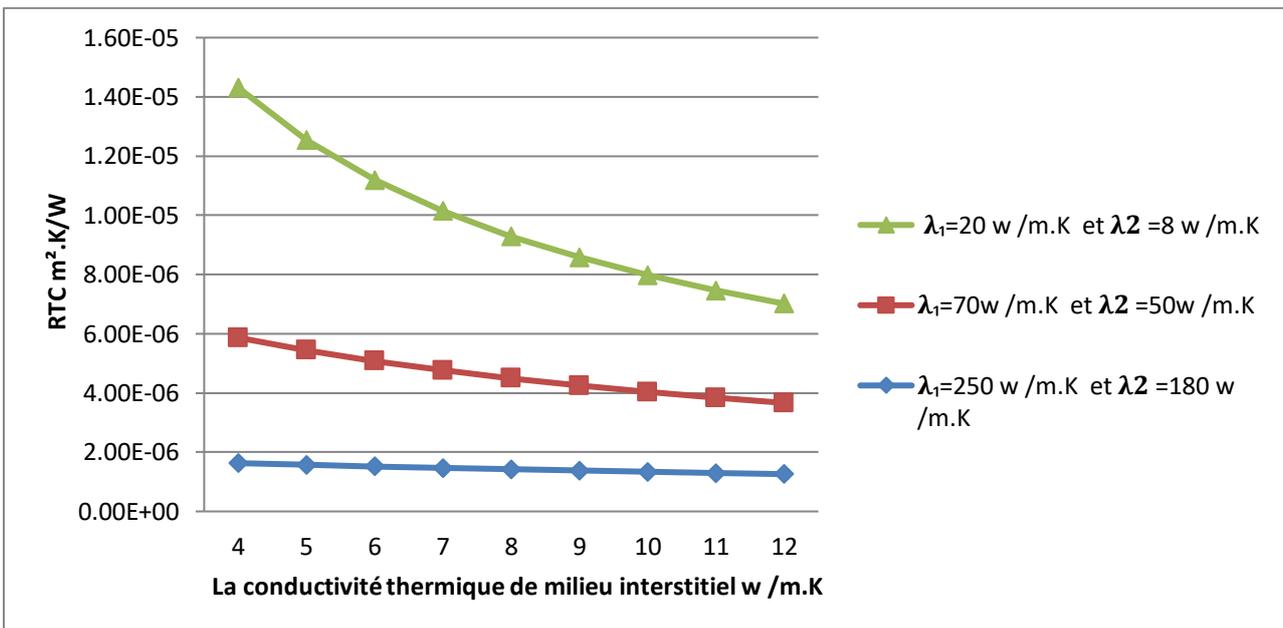
(b)

Figure IV.7 : variation de RTC en fonction de milieu interstitiel avec des conductivités thermiques

a) : $\lambda_1=25$  w /m.K et  $\lambda_2 =10$  w /m.K, b) : $\lambda_1=20$  w /m.K et  $\lambda_2 =8$  w /m.K.



(a)



(b)

Figure IV.8 : Variation de RTC en fonction de milieu interstitiel avec des conductivités thermiques six couples. a) : $\lambda_1=300$  w /m.K et  $\lambda_2 =220$  w /m.K,  $\lambda_1=100$  w /m.K et  $\lambda_2 =60$  w /m.K et  $\lambda_1=25$  w /m.K et  $\lambda_2 =10$  w /m.K, b) :  $\lambda_1=250$  w /m.K et  $\lambda_2 =180$  w /m.K  $\lambda_1=70$  w /m.K et  $\lambda_2 =50$  w /m.K et  $\lambda_1=20$  w /m.K et  $\lambda_2 =8$  w /m.K.

**IV.3.CONCLUSION**

L'étude présentée dans cette partie est une étude analytique d'un contact rugueux entre deux matériaux en utilisant l'Excel pour calculer et tracer les courbes, le but de ce travail est d'étudier l'impact milieu interstitiel sur la résistance thermique de contact, à cet effet le RTC est calculé pour des matériaux en contact de faible, moyenne, et forte conductivité thermique en fait variant la conductivité thermique et rugosité milieu interstitiel obtenus montrent que :

- a- la conductivité thermique de milieu interstitiel est très importante dans la diminution la résistance thermique de contact ce que permet de améliorer le transfert thermique entre les deux solides en contact.
- b- le transfert thermique est optimal dans le cas de rugosité petite, ce qui permet d'améliorer le transfert thermique entre les solides en contact rugueux.
- c- la conductivité thermique élevée et meilleur pour obtenir un bon résultat par rapport de la conductivité thermique et faible.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

---

L'objectif de ce travail est une étude analytique entre deux matériaux solides en contact rugueux pour calculer le RTC qui est affecté par la rugosité  $R_a$  et la conductivité thermique du milieu interstitiel et de conclure comment améliorer le transfert thermique entre deux substances solides en contact rugueux.

Et nous avons conclu ;

- 1- La conductivité thermique du milieu interstitiel joue un rôle très important dans la diminution la résistance thermique de contact, donc un fluide interstitiel bon conducteur améliore considérablement le transfert thermique entre les deux solides en contact.
- 2- la rugosité des interfaces de contact influe fortement sur la RTC, donc une surface rugueuse donne un RTC élevé
- 3- Un transfert thermique optimal pour un contact moins rugueux (interfaces lisses) et matériaux en contact bons conducteurs

Dans les futurs travaux, il serait très intéressant d'étudier numériquement l'effet de la rugosité de surface et la conductivité thermique du milieu interstitiel sur la résistance thermique.

# References

# Bibliographiques

## References Bibliographiques

---

- [1]: Q.Q. Zhou, L. Yang, C. Luo, F.W. Chen, Y.C. Zhou, Y.G. Wei, Thermal barrier coatings failure mechanism during the interfacial oxidation process under the interaction between interface by cohesive zone model and brittle fracture by phase-field, *International Journal of Solids and Structures* 2021, P.18-34.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.12.020>
- [2]: Chao Zhang, Hsien-Yang Yeh, 1998, An analytical model for thermal residual interface-stresses in continuous-fiber-reinforced composites, *International Journal of Solids and Structures*, 1998, P.457-477.  
[https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(97\)00032-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(97)00032-2)
- [3]: Heiji, Watanabe, Masakazu Ichikawa, Influence of the initial Si surface structures on SiO<sub>2</sub>/Si(111) interfaces and thermal decomposition of the oxide films, 1998, P. 95-100.  
[https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(98\)00158-7](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(98)00158-7)
- [4]: Chang Ding, Rongshun Wang, Thermal contact conductance of stain less steel-GFRP interface under vacuum environment, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, P.15.  
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.023>
- [5]: S Roy, C Jacob, M Zhang, S Wang, A. K Tyagi, S Basu, SIMS, RBS and glancing incidence X-ray diffraction studies of thermally annealed Ru/ $\beta$ -SiC interfaces, *Applied Surface Science*, 2003, P.300-307.  
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00255-1](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00255-1)
- [6]: D. Faccio, A. Busacca, D. W. J. Harwood, G. Bonfrate, V. Pruneri, P. G. Kazansky, Effect of core-cladding interface on thermal poling of germano-silicate optical waveguides, *Optics Communications* 2001, P.187-190. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(01\)01385-2](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(01)01385-2)
- [7]: Eimutis Juzeliūnas, Johann H Hinken, A SQUID study of magnetic fields induced by the metal-liquid, interface, *Electro chemical Acta*, 2000, P.3453-3459. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(00\)00414-X](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00414-X)
- [8]: K. Song, H.P. Song, P. Schiavone, C.F. Gao, Electric current induced thermal stress around a bi-material interface crack, *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, P.1-12.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.01.004>

## References Bibliographiques

---

- [9]: H.S. Udaykumar,L, Sharp-interface simulation of dendritic solidification of solutions, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, P.4793-4808.[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00194-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00194-1)
- [10]: Majid Bahrami, M. Michael Yovanovich,J. Richard Culham, Thermal contact resistance at low contact pressure, Effect of elastic de formation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, P.10-13.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.02.033>
- [11]: H.S. Fang, Y.Y.Pan, L.L. Zheng, Q.J. Zhang, S. Wang, Z.L. Jin, To investigate interface shape and thermal stress during sapphire single crystal growth by the Cz method ,Journal of Crystal Growth, January 2013, P.25-32. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2012.09.050>
- [12]: E.Chapelle,B.Garnier,B.Bourouga, Interfacial thermal resistance measurement between metallic cwire and polymer in polymer matrix composites, International Journal of Thermal Sciences, 2009, P. 2221-2227.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.05.001>
- [13]: Mostafa H. Sharqawy,Esmail M. Mokheimer,Hassan M. Badr, Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers, Geothermics, 2009, P.271-277.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.02.001>
- [14]: AïssaAllaoui,Suong V. Hoa,PierreEvesque,JinBo Bai, Electronic transport in carbon nano tube tangle sunder compression, The role of contact resistance, Scripta Materialia, 2009, P. 628-631.  
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.05.045>
- [15]: Germán P. Hernández,A.S. Juarez,M.C. Resendiz,X. Mathew, Influence of the Au interlayer on the contact resistance and morphology of CdTe films deposited on molybdenum substrate ,Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, P.2289-2296. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.03.002>
- [16] :MariusDillig, Thomas Biedermann, Jürgen Karl, Journal of Power Sources ,Thermal contact resistance in solid oxide fuel cell stacks ,Journal of Power Sources, 2015, P. 69-76.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.031>

## References Bibliographiques

---

- [17]: Carlos D. Luzi, Sergio D. Keegan, Néstor J. Mariani, Guillermo F. BarretoIls, Evaluation of the spreading thermal resistance for rough spheres ,International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, P.826-831. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.048>
- [18]: Zheng Yua, Katir Ziouche, Zahia Bougrioua, Pascale Lejeune, Tuami Lasri, Didier Leclercq ; A planar micro thermoelectric generator with high thermal resistance ,Sensors and Actuators A : Physical, 2015, P.67-76. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.10.026>
- [19]: Dongmei Bi, Huanxin Chen, Tian Ye, Influences of temperature and contact pressure on thermal contact resistance at interfaces at cryogenic temperatures, 2012, P.403-409.  
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2012.03.006>
- [20]: Tengfei Cui, Qiang Li, Yimin Xuan, Characterization and application of engineered regular rough surfaces in thermal contact resistance ,Applied Thermal Engineering, 2014, P.400-409.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.020>
- [21]: T. Fiedler, N. White, M. Dahari, K. Hooman, On the electrical and thermal contact resistance of metal foam, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, P.565-571.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.045>
- [22]: A. A. Yevtushenko, M. Kuciej, O. Yevtushenko, Three-element model of frictional heating during braking with contact thermal resistance and time-dependent pressure ,International Journal of Thermal Sciences, 2011, P. 1116-1124. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.11.009>
- [23]: Y. Yan, X. J. She, H. Zhu, S. D. Wang, Origin of bias stress induced instability of contact resistance in organic thin film transistors, Organic Electronics, 2011, P. 823-826.  
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2011.02.019>
- [24]: Qingyu Meng, Xinxin Yan, Changcheng Sun, Yang Liu, Research on thermal resistance network modeling of motorized spindle based on the influence of various fractal parameters, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, P.105-106.

## References Bibliographiques

---

<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104806>

[25]: Xing-Jie Ren, Yan-Jun Dai, Jian-Jun Gou, Wen-Quan Tao, Numerical study on thermal contact resistance of 8-harness satin woven pierced composite, International Journal of Thermal Sciences, 2021, P.106-108.

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106584>

[26]: Maohua et al Synergistic effect of carbon fiber and graphite on reducing thermal resistance of thermal interface materials, Composites Science and Technology, 2021, P.108-109.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108883>

[27]: Biao Feng, Yu-Hong Zhang, Jing Tu, Li-Wu Fan, Zi-Tao Yu, Correlating the thermal contact resistance between metal/erythritol interfaces with surface roughness and contact pressure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, P.121-407. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121407>

[28]: Tengfei Cui, Qiang Li, Yimin Xuan, Ping Zhang, Multi scale simulation of thermal contact resistance in electronic packaging, International Journal of Thermal Sciences, 2014, P. 16-24.

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.04.006>

[29] : Sophie Mergui, TRANSFERTS THERMIQUES, LICENCE DE MECANIQUE 2 EME ANNEE MODULE 2A101, P.03-06. <https://www.coursehero.com/file/54896194/cours-thermique-L2pdf/>

[30]: Bardon, J.-P., Cassagne, B., Foucher, B. et Saint-Blanquet, C. Bilan des principales recherches sur les résistances thermiques de contact. Nantes : Laboratoire de Thermocinétique, 1971, P.70.

<https://core.ac.uk/download/pdf/51335214.pdf>

[31]: Fourcher, B., Bardon, J.P et Mallard, H. Transferts de chaleur en régime périodique à l'interface de deux milieux : problèmes posé par l'écriture des conditions aux limites classiques. Entropie, 1975, N° 64, p. 11-26. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL7670102850>

[32]: Snaith, B., Probert, S. D. and O'Callaghan, P. W. Thermal resistances of pressed contacts. Applied Energy, 1986, Vol. 22, p. 31-84. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0306261986900735>

[33]: Laurent, M. Contribution à l'étude des échanges de chaleur au contact de deux matériaux. Thèse de

## References Bibliographiques

---

doctorat d'Etat, Fac. des Sciences de Lyon, 1969, P128.

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03014679/document>

[34]: Bardon, J. P. Heat Transfer at solid-solid interface: basic phenomenom, recent works. Proc. Eurotherm, N° 4, Nancy, 28 - 30 Juin 1988, p. 40-74. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/333868>

[35]: Sanokawa, K. Heat Transfer between metallic surfaces in contact ( 4 reports). Bulletin of JSME, 1968, Vol 11, N° 44, p.253-293. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0306261986900735>

[36]: Stevenson, P. F., Peterson, G.P. and Fletcher, L. S. Thermal rectification in similar and dissimilar metal contacts. Journal of Heat Transfer, 1991, Vol. 113, P.30-36.

<https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/issue/113/1>