

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Saad Dahlab Blida 1  
Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales  
Département Construction Aéronautique



**Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de

**Master en Aéronautique**

*Option : Propulsion avion*

**Intitulé du Projet :**

**« Analyses et investigations thermiques. »**

Projet de **Startup** présenté dans le cadre de l'arrêté ministériel "1275", assurée par l'Institut d'Aéronautique et des Etudes Spatiales. IAES

Proposé et dirigé par : Dr. Bennia Imene

Réalisé par :

Codirigé par : Dr Amri Redha

Mr. Haddou Seddik

Mr. Koudri Karim

*Soutenue devant le jure composer de :*

Dr. Hamidi Khaoula Narimen

MCB

Président

Dr. Adda Mourad

MAA

Examineur

Dr. Krim Mouhamed

MCB

Formateur

Dr. Bakhti Ahmed

MCB

Représentant du partenaire économique

*Promotion : 2022 / 2023*



## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord, nous remercions dieu qui nous a permis de faire ce travail.

Nous adressons nos remerciements à notre promotrice madame BENNIA qui nous a donné l'aide et l'assistance par sa disponibilité, ces conseils et ses orientations durant toute la période de la réalisation de notre projet.

Nous adressons aussi nos remerciements à monsieur AMRI qui nous a beaucoup aidé par sa disponibilité et son engagement au travail.

Nous tenons à remercier toute personne qui a contribué de Près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance à nos enseignants de l'institut d'Aéronautique ainsi que nos amis et camarades.

Nous tenons à remercier nos familles de nous avoir soutenu, nous ne serons jamais assez reconnaissants envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tous ce qu'on entreprend.

Nous remercions également Mr le président et membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

# TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	I
LISTE DES TABLEAUX.....	II
LISTE DES FIGURES .....	III
NOMENCLATURE .....	VII
RESUME .....	IX
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE I. GENERALITE ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur le transfert thermique .....	3
I.2.1. Introduction .....	3
I.2.2. Grandeurs physiques en thermiques.....	4
I.2.2.1. Température.....	4
I.2.2.2. Flux de chaleur .....	4
I.2.2.3. Densité de flux de chaleur .....	4
I.2.3. Principaux modes de transfert de chaleur .....	4
I.2.3.1. Conduction.....	4
I.2.3.1.1. Introduction.....	4
I.2.3.1.2. Loi de Fourier .....	5
I.2.3.1.3. Équation de la conduction thermique .....	5
I.2.3.1.4. Les Paramètres qui influent sur la conduction thermique.....	7
I.2.3.2. Convection.....	8
I.2.3.3. Rayonnement.....	9
I.2.4. Notions sur les Structures poreuses.....	9
I.2.4.1. Introduction .....	9
I.2.4.2. La morphologie des pores.....	10

I.3. Travaux relatifs au domaine.....	11
CHAPITRE II. SIMULATION PAR NASTRAN /PATRAN.....	19
II.1. Introduction : .....	19
II.2. Les étapes pour réaliser la simulation.....	20
II.2.1. Géométrie.....	22
II.2.2. Le maillage.....	22
II.2.3. Définition des matériaux et des propriétés des éléments .....	24
II.2.4. Définition des conditions aux limites .....	24
II.2.5. Définition de l'analyse .....	24
II.2.6. Visualisations des résultats .....	25
II.3. Exemple 1 : Analyse instationnaire d'une plaque simple .....	25
II.4. Exemple 2 : plaque trouée .....	33
II.5. Conclusion .....	38
CHAPITRE III. OUTILS ET CONFIGURATIONS EXPEREMENTALS .....	39
III.1. Introduction .....	39
III.2. Le materiel utilisé.....	39
III.2.1. Thermocouple type k .....	39
III.2.2. Le MAX6675.....	40
III.2.3. Le DS18B20 .....	41
III.2.4. Le capteur LM35 .....	41
III.2.5. Arduino Uno .....	42
III.2.6. Le microcontrôleur pic16f877A .....	43
III.2.7. Le FTDI FT232 .....	44
III.2.8. Plaque chauffante .....	45
III.2.9. Adhésif isolé.....	46
III.2.10. Les échantillons étudiés.....	46
III.3. Les logiciels utilisé.....	48

III.3.1. Arduino IDE .....	48
III.3.2. MikroC.....	49
III.3.3. Proteus .....	50
III.3.4. Le logiciel LabVIEW .....	52
III.3.4.1. Environnement du Logiciel LabVIEW .....	53
III.3.4.2. Le Front Panel.....	53
III.3.4.3. Le Block Diagramme .....	55
III.3.4.4. L'acquisition et traitement de données par LabVIEW .....	57
III.4. Flux de données et Configuration expérimental .....	62
III.4.1. Circuit 1 (Figure III 31) .....	62
III.4.2. Circuit 2 (Figure III 32) .....	63
III.5. Conclusion.....	64
CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	66
IV.1. Introduction.....	66
IV.2. Modèles considérés .....	66
IV.3. Résultats Numériques .....	67
IV.3.1. Etude de l'indépendance du maillage .....	67
IV.3.2. Effet des paramètres .....	68
IV.3.2.1. Nombre de trous .....	68
IV.3.2.2. Diamètre des trous .....	73
IV.3.2.3. Distribution de trous .....	78
IV.3.2.4. La forme des pores.....	80
IV.3.2.5. Le matériau utilisé .....	81
IV.3.2.6. Les résultats expérimentaux .....	83
IV.4. Conclusion .....	89
CONCLUSION GENERALE.....	90
ANNEXE .....	92

REFERENCES ..... 103

## LISTE DES TABLEAUX

Table I.1 Propriétés thermiques de différents produits solides.....	8
Table IV.1 Résultats obtenus pour différentes conditions aux limites et différents nombres de trous.....	71
Table IV.2 Résultats obtenus pour différents diamètres de trous. ....	74
Table IV.3 Résultats obtenus pour différentes conditions aux limites et différents diamètres de trous.....	76



## LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Représentation schématique du modèle physique [9].....	13
Figure I-2 Représentation schématique du modèle physique [5].....	14
Figure I-3 Représentation schématique du modèle physique [7].....	15
Figure I-4 Représentation schématique du modèle physique [6].....	16
Figure I-5 Représentation schématique du modèle physique [11].....	17
Figure I-6 Représentation schématique du modèle physique [10].....	18
Figure II-1 . L'interface de Patran 2018 .....	20
Figure II-2 Schématisation de la simulation par Patran/Nastran .....	21
Figure II-3 Définition des préférences du model 1 .....	25
Figure II-4 La géométrie du model et la configuration nécessaire .....	26
Figure II-5 Définition de la taille initiale des éléments du maillage.....	26
Figure II-6 Le maillage de géométrie avec le paramétrage de création.....	27
Figure II-7 Spécification des propriétés du matériau : (a) nommé le matériau aluminium (b) Définition de leurs propriétés.....	27
Figure II-8 Attribution des propriétés des éléments et spécification de leur épaisseur. ....	28
Figure II-9 Sélection de la région d'application des propriétés. ....	28
Figure II-10 Définition de la température au bord inférieur et supérieur de la plaque : (a) Définition de la température à 20°C, (b) sélection de la région d'application (c) visualisation correspondante dans Patran.....	29
Figure II-11 Création d'un cas de charge : (a) nommé le cas « transient » (b) sélectionner leur charge .....	29
Figure II-12 analyse : (a) nommé le cas « transient » (b) sélection leur charge .....	30
Figure II-13 Définition du pas de temps et du nombre d'itération de l'analyse pour le cas transient : (a)sélection le cas transient (b) défini le pas et le nombre d'itération. ....	31
Figure II-14 Accéder aux données des résultats (.xdb) créées par MSC Nastran : (a) configuration, (b) selecte le fichier de résultats. ....	32
Figure II-15 Configuration pour la visualisation des résultats sous forme de contours. ....	33
Figure II-16 Configuration de la création de courbes et de leur visualisation.....	34
Figure II-17 Configuration de l'application avec l'option de transformation pour créer d'autres courbes : (a) Transformation de la courbe 1 le long de l'axe x, (b) Transformation des deux courbes (1, 2) le long de l'axe y. ....	35

Figure II-18 Visualisation de la surface avec les Coubes. ....	36
Figure II-19 Configuration pour éditer la surface en utilisant l'option de découpage. ....	36
Figure II-20 Configuration pour supprimer les surfaces intérieures avec la visualisation de la géométrie finale du model 2. ....	37
Figure II-21 Configuration de la création de la taille des éléments avec la visualisation correspondante du model 2. ....	37
Figure II-22 Configuration de la création du maillage non structuré en éléments triangulaires du model 2 avec les paramètres correspondants. ....	38
Figure III-1 Thermocouple type k.....	40
Figure III-2 Le MAXX6675. ....	40
Figure III-3 Capteur de température DS18B20. ....	41
Figure III-4 Le capteur LM35.....	42
Figure III-5 Arduino UNO.....	43
Figure III-6 Le PIC16F877A. ....	44
Figure III-7 Le FTDI FT232. ....	45
Figure III-8 Plaque chauffante. ....	45
Figure III-9 Adhésif isolant. ....	46
Figure III-10 Echantillons en aluminium qui montrent le changement de nombre des trous..	47
Figure III-11 Echantillons de 10 trous au même diamètre pour différents matériaux(a) plaque en aluminium (b) plaque en titane. ....	47
Figure III-12 Echantillons en titane pour une plaque simple et une plaque trouée (10 trous).	48
Figure III-13 Arduino IDE principale interface.....	49
Figure III-14 la façade Principale de MIKROC. ....	50
Figure III-15 Simulation de circuit basé sur Arduino UNO. ....	51
Figure III-16 Simulation de circuit basé sur le microcontrôleur PIC 16F877A. ....	52
Figure III-17 Palette de contrôles. ....	54
Figure III-18 Front panel de LabVIEW. ....	55
Figure III-19 Palette des fonctions.....	56
Figure III-20 Block diagramme, 1 : les contrôles, 2 : les indicateurs, 3 : les structures (les boucles, les conditions), 4 : outils de comparaison, 5 : opérations numériques, 6 : booléennes, 7 : les fonctions ou Vis.....	57
Figure III-21 VISA Serial. ....	58
Figure III-22 les fonctions des VISA serial. ....	58

Figure III-23 Nombre/texte converti.....	59
Figure III-24 Les fonctions des conversations.....	59
Figure III-25 Fichier Bibliothèque d'input output.....	59
Figure III-26 Les fonctions du fichier Bibliothèques.....	60
Figure III-27 Block diagramme de subVI qui lit les donnes et les enregistre dans un fichier txt .....	60
Figure III-28 Principale page d'application.....	61
Figure III-29 Interface du test 1.....	61
Figure III-30 Interface du test 2.....	62
Figure III-31Circuit 1.....	64
Figure III-32 Circuit 2.....	64
Figure IV-1 Modèles physiques. (a) plaque poreuse, (b) plaque simple.....	67
Figure IV-2 Résolution pour différents maillages de plaque trouée en aluminium (20 trous) de dimensions (0.1×0.1 m).....	67
Figure IV-3 la distribution de température pour la première condition aux limites : (a) sur une plaque simple, (b) sur une plaque poreuse. La distribution de température pour la deuxième condition aux limites : (c) sur une plaque simple, (d) sur une plaque poreuse.....	69
Figure IV-4 Profils de températures au nœud considéré pour la 1ère condition aux limites et différents nombres de trous pour un diamètre de 0.04 m.....	70
Figure IV-5 Profils de températures au nœud considéré pour la 2ème condition aux limites et différents nombres des trous pour un diamètre de 0.04 m.....	70
Figure IV-6 Profils de température en fonction des porosités pour deux conditions aux limites.....	71
Figure IV-7 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 6 pour une plaque de dimensions (0.2×0.3 m).....	73
Figure IV-8 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 8, pour une plaque de dimensions (0.2× 0.3 m).....	74
Figure IV-9 Profils de températures pour différents diamètres de trous (en mm) et un nombre de trous d'égale à 8, pour une plaque de dimensions (0.2×0.3 m). .....	75
Figure IV-10 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 50, pour une plaque de dimensions (0.2×0.3 m).....	75
Figure IV-11 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 8, pour une plaque de dimensions (0.1×0.1 m).....	76

Figure IV-12 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 8, pour une plaque de dimensions (0.05×0.05 m).....	76
Figure IV-13 La distribution de température pour différent positionnement des trous : (a) x= 0.075 m, (b) x= 0.05 m, (c) x= 0.025 m.....	79
Figure IV-14 profils de températures pour différentes positions de trous (plusieurs positions sur l'axe " x"). .....	79
Figure IV-15 Distribution de température pour différentes formes de trous : (a) cercle, (b) Carré, (c) triangle.....	80
Figure IV-16 Profils de températures pour différentes formes de trous. ....	81
Figure IV-17 Profils de températures pour différents matériaux pour la 1ère condition aux limites.....	82
Figure IV-18 Profils de températures pour différents matériaux pour la 2 <sup>ème</sup> condition aux ..	82
Figure IV-19 Profils de température d'une plaque simple en aluminium de dimensions (0.1× 0.1 m) obtenues par la simulation et par la partie expérimentale .....	84
Figure IV-20 Profils de température d'une plaque trouée en aluminium de dimensions (0.1×0.1 m), pour (20 trous), de diamètre (0.005 m) obtenues par la simulation et par la partie expérimentale.....	85
Figure IV-21 Profils de température d'une plaque trouée en aluminium, de dimensions (0.15×0.2 m), pour (10 trous), de diamètre (0.11 m) obtenues par la simulation et par la partie expérimentale.....	85
Figure IV-22 Profils de température d'une plaque trouée en titane, de dimensions (0.15×0.2 m), pour (10 trous), de diamètre (0.11 m), obtenues par la simulation et par la partie expérimentale.....	86
Figure IV-23 Profils de température sur une plaque simple en titane de dimensions (0.15×0.2 m) et sur une autre plaque trouée de 10 trous. ....	86
Figure IV-24 Profils de température d'une plaque en aluminium pour différents nombres de trous obtenus par la partie expérimentale. ....	87
Figure IV-25 Profils de température pour deux différents matériaux pour des dimensions de (0.15×0.2 m), de 10 trous, et de diamètre 0.11 m obtenus par la partie expérimentale.....	87

## NOMENCLATURE

### Letters

A	Surface de contact	[m <sup>2</sup> ]
E	L'Épaisseur	[m]
C <sub>p</sub>	Chaleur spécifique	[J/Kg.]
g	La gravité	[m/s <sup>2</sup> ]
h	Coefficient de convection	[W/m <sup>2</sup> . k]
H	Hauteur	[m]
K	La conductivité thermique	[W/m. K]
K <sub>s</sub>	Conductivité thermique du solide	[W/m. K]
K <sub>f</sub>	Conductivité thermique du fluide	[W/m. K]
L	Langueur	[m]
Q	Flux de chaleur	[W]
q	Densité de flux	[W/m <sup>2</sup> ]
S	Source de Chaleur	[W/m <sup>2</sup> ]
T	La température	[C°]
T <sub>f</sub>	Température de fluide	[C°]
T <sub>E</sub>	Température Est	[C°]
T <sub>O</sub>	Température Ouest	[C°]
T <sub>N</sub>	Température Nord	[C°]
T <sub>S</sub>	Température Sud	[C°]
t	Temps	[s]
V	Volume totale de structure	[m <sup>3</sup> ]
V <sub>p</sub>	Volume de pores	[m <sup>3</sup> ]
x	Coordonnées de l'espace	[m]
y	Coordonnées de l'espace	[m]

$z$	Coordonnées de l'espace	[m]
$\alpha$	La diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup> ]
$\Delta T$	Gradient de température	[C°]
$\rho$	Densité	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	La Porosité	-

### **Indices**

f	Fluide
P	Pores
s	Solide
S	Sud
E	Est
N	Nord
O	Ouest

## RESUME

L'objectif de ce mémoire est d'étudier le transfert de chaleur sur des structures poreuses de différentes géométries et différents matériaux et voir l'influence de ces porosités sur le refroidissement des structures. Différentes Simulations par le logiciel Nastran/ Patran ont été faites. Afin de valider les résultats numériques une partie expérimentale à été réalisé. La mesure des températures est basée sur les capteurs électriques Thermocouple **Type K**, **DS18B20** et **LM35**. Pour collecter les données des températures captées, des circuits ont été utilisées basés en premier lieu sur la carte Arduino programmé par **Arduino IDE** et en deuxième lieu sur le microcontrôleur **Pic 16F877A** programmé par le logiciel **MikroC** et simuler par **Proteus**. Afin de visualiser, d'analyser et de contrôler les données, le logiciel **LabVIEW** à été utilisé et une interface personnalisée à été créée. Les résultats obtenus montrent, que la température diminue en augmentant le nombre de trou et le diamètre des trous. Il y'a certaines distributions de trous qui donnent de meilleurs résultats par rapport à d'autre. Pour des métaux avec haute conductivité thermique (Aluminium, cuivre), la température augmente et se stabilisent rapidement. Les résultats expérimentaux concordent très bien avec les résultats de Simulation.

**Mots clés** : Transfert de chaleur, Structures poreuses, Simulation, Expérimental, Capteurs, Mesures de température

## ABSTRACT

The objective of this dissertation is to study heat transfer on porous structures with different geometries and materials and investigate the influence of these porosities on the cooling of the structures. Various simulations using the **Nastran/Patran** software were conducted. To validate the numerical results, an experimental part was performed. Temperature measurements were based on Thermocouple **Type K**, **DS18B20**, and **LM35** electrical sensors. Circuits were utilized to collect the recorded temperature data, employing the Arduino board programmed with **Arduino IDE** initially and later the **Pic 16F877A** microcontroller programmed with **MikroC** software and simulated with Proteus. **LabVIEW** software was used for data visualization, analysis, and control, and a customized interface was created. The results obtained demonstrate that the temperature decreases with an increasing number of pores and pore diameter. Certain hole distributions yield better results compared to others. For metals with high thermal conductivity (such as aluminum and

copper), the temperature increases and stabilizes rapidly. The experimental results align closely with the simulation results.

**Keywords:** Heat transfer, porous structures, Simulation, Experimental, Sensors, Temperature measurements.

### ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة نقل الحرارة في الهياكل المسامية ذات الهندسة المختلفة والمواد المختلفة واستكشاف تأثير هذه المسامية على تبريد الهياكل. تم إجراء محاكاة مختلفة باستخدام برنامج **Nastran/Patran**. لتحقيق التأكيد على النتائج العددية ، تم إجراء جزء تجريبي. يستند على قياسات درجات الحرارة باستعمال أجهزة استشعار مستشعر حراري نوع **K** , **DS18B20** و **LM35**. تم استخدام الدوائر لجمع بيانات درجات الحرارة المسجلة ، بدءًا من لوحة **Arduino** القابلة للبرمجة وفيما بعد متحكم **Pic 16F877A** المبرمج بواسطة برنامج **MikroC** ومحاكاة بواسطة **Proteus**. تم استخدام برنامج **LabVIEW** لتصوير البيانات وتحليلها والتحكم فيها ، وتم إنشاء واجهة مخصصة. تُظهر النتائج المستخلصة أن درجة الحرارة تنخفض مع زيادة عدد الثقوب وقطر المسامات. هناك توزيعات معينة للثقوب تعطي نتائج أفضل بالمقارنة مع الأخرى. بالنسبة للمعادن ذات التوصيل الحراري العالي (مثل الألومنيوم والنحاس) ، ترتفع درجة الحرارة وتستقر بسرعة. تتفق النتائج التجريبية بشكل جيد مع نتائج المحاكاة.

**الكلمات المفتاحية:** نقل الحرارة، الهياكل المسامية، المحاكاة، التجريبي، أجهزة الاستشعار، قياسات درجات الحرارة.



## INTRODUCTION GENERALE

L'analyse thermique des structures poreuses est un domaine de recherche en pleine expansion, qui vise à étudier et à optimiser les performances thermiques des matériaux et des systèmes poreux dans diverses applications industrielles, telles que l'aérospatiale, isolation thermique, les échangeurs de chaleur, les filtres et les catalyseurs, l'automobile, l'énergie et la construction. Les structures poreuses présentent des caractéristiques uniques, telles que la porosité, la taille des pores et la conductivité thermique, qui influencent de manière significative les mécanismes de transfert de chaleur et les propriétés thermiques des matériaux. Afin de mieux comprendre ces phénomènes complexes et d'améliorer la conception des matériaux et des systèmes poreux. De plus, elles permettent d'évaluer l'impact des différentes configurations de structures poreuses sur les propriétés thermiques et les performances des systèmes dans lesquels elles sont intégrées. Il est essentiel de combiner des approches expérimentales et numériques pour l'analyse thermique.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette étude est d'examiner les mécanismes de transfert de chaleur dans les structures poreuses, en mettant l'accent sur les aspects théoriques, expérimentaux et numériques. Pour aborder ce thème, plusieurs approches seront utilisées.

L'utilisation de logiciels de simulation, tels que Patran Nastran, permet de modéliser et d'analyser les phénomènes thermiques dans les structures poreuses, en tenant compte des effets de la conduction, de la convection et du rayonnement. Les simulations réalisées avec Patran Nastran offrent la possibilité de prédire avec précision les températures, les flux de chaleur et les distributions de contraintes thermiques dans les matériaux poreux, en fonction des variations de porosité, de taille de pore et de conductivité thermique.

Parallèlement aux simulations numériques, des études expérimentales sont menées pour calibrer et valider les modèles numériques, garantissant ainsi la fiabilité et la précision des prédictions.

La méthode utilisée dans l'étude expérimentale pour collecter les données des températures captées est basé sur l'utilisation des cartes programmable **Arduino Uno** ou bien la carte pic, plus des capteurs de mesure de température. On utilise le logiciel **LabVIEW** pour visualiser, analyser et de contrôler les résultats.

Le premier chapitre, présente des définitions et des notions fondamentales relatives au transfert thermique ainsi la description des structures poreuses et les caractéristiques qui lui influence. Par la suite on citera quelques travaux expérimentaux liés à notre thème.

Dans le deuxième chapitre, nous citons toutes les notions nécessaires et étapes pour la simulation avec les logiciels **NASTRAN PATRAN**, ensuite nous présentons des exemples de manipulation sur des plaques de conditions aux limites choisis pour le cas sans trous et le cas troué.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de tous les outils et les logiciels nécessaires pour réaliser la partie expérimentale (les logiciels **MikroC**, **Proteus** et le logiciel **LabVIEW**).

Dans le quatrième chapitre, nous présentons et discutons les résultats obtenus, par la simulation numérique, et nous déduisons l'effet des paramètres influençant sur les structures poreuses. Puis nous présenterons les résultats expérimentaux qui permettent de valider nos résultats de simulation.

**CHAPITRE I**  
**GENERALITE ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

# **CHAPITRE I. GENERALITE ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## **I.1. Introduction**

Le transfert thermique est un domaine essentiel de la physique et de l'ingénierie qui étudie les mécanismes d'échange d'énergie thermique entre différents systèmes et environnements. Ce chapitre aborde les généralités sur le transfert thermique, en présentant les trois principaux modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. Nous explorerons les concepts fondamentaux ainsi que les lois régissant ces phénomènes. Nous examinerons également les différentes caractéristiques et paramètres qui influent sur la conduction thermique et le transfert thermique dans les structures poreuses. Ensuite, nous effectuerons une recherche bibliographique axée essentiellement sur ce thème.

## **I.2. Généralités sur le transfert thermique**

### **I.2.1. Introduction**

Le transfert de chaleur est le processus par lequel l'énergie thermique est transférée d'un système à un autre. Le transfert thermique est l'un des modes les plus courants d'échange et joue un rôle essentiel dans divers domaines tels que l'ingénierie, la physique, la météorologie et la thermodynamique, la climatisation et le chauffage, la conception de systèmes de refroidissement pour les appareils électroniques ...etc.

Le transfert thermique se produit en raison d'une différence de température entre les systèmes en contact. L'énergie thermique se déplace des régions chaudes vers les régions plus froides conformément à la deuxième loi de la thermodynamique, dans le but d'établir un équilibre thermique. Ces différences de température caractérisent l'intensité de l'énergie transférée. Il existe trois principaux modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

## **I.2.2. Grandeurs physiques en thermiques**

### **I.2.2.1. Température**

La température est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules d'un système. Elle est couramment exprimée en degrés Celsius (°C), en Kelvin (K) ou en Fahrenheit (°F). La différence de température entre deux systèmes ou deux points d'un système joue un rôle essentiel dans le transfert thermique, car elle détermine la direction et l'intensité du flux de chaleur

### **I.2.2.2. Flux de chaleur**

Le flux de chaleur est la quantité d'énergie thermique transférée par unité de temps à travers une surface ou entre deux systèmes. Il est généralement exprimé en watts (W). Le flux de chaleur dépend des propriétés des matériaux, de la différence de température et de la surface de contact.

### **I.2.2.3. Densité de flux de chaleur**

La densité de flux de chaleur est le flux de chaleur par unité de surface. Elle est généralement exprimée en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>). La densité de flux de chaleur est utile pour comparer l'intensité du transfert thermique dans différentes situations ou pour des matériaux différents. Pour calculer la densité de flux de chaleur, divisez le flux de chaleur (Q) par la surface de contact (A) :

$$q = Q / A \tag{I.1}$$

## **I.2.3. Principaux modes de transfert de chaleur**

### **I.2.3.1. Conduction**

#### **I.2.3.1.1. Introduction**

La conduction thermique est un mécanisme essentiel de transfert de chaleur qui se produit principalement dans les solides ou entre des objets en contact direct, tels que les métaux, sans déplacement net de matière. Elle joue un rôle crucial dans la transmission de l'énergie thermique des zones chaudes vers les zones froides. La conduction thermique repose

sur deux mécanismes de base : la vibration des atomes et la présence d'électrons libres. Ce phénomène est régi par la loi de Fourier.

Dans les structures poreuses, qui sont des matériaux contenant des pores ou des cavités, ce processus de transfert de chaleur est influencé par les propriétés du matériau solide, les propriétés du fluide présent dans les pores et la structure des pores eux-mêmes. Cependant, il convient de noter que la conduction thermique est généralement plus efficace dans les solides que dans les fluides.

#### **I.2.3.1.2. Loi de Fourier**

La loi de Fourier est une loi fondamentale qui décrit comment la chaleur est transférée à travers un matériau en raison d'un gradient de température. Elle est essentielle pour comprendre et analyser les phénomènes de conduction thermique dans diverses applications pratiques.

La loi de Fourier stipule qu'il existe une relation linéaire entre la densité de flux et le gradient de température : dans le cas d'un milieu isotrope, la densité de flux est proportionnelle au gradient de température [1].

$$\text{Loi de Fourier} \quad Q = -K * A * \left(\frac{\Delta T}{d}\right) \quad (\text{I.2})$$

#### **I.2.3.1.3. Équation de la conduction thermique**

##### **1) Équation de la conduction thermique unidimensionnelle (1D)**

$$\partial T / \partial t = \alpha * (\partial^2 T / \partial x^2) + S(x, t) \quad (\text{I.3})$$

Où :

$$\alpha = k / (\rho C p)$$

- $T(x, t)$  : est la température à un point donné (x) et à un instant donné (t), [k]
- $\partial T / \partial t$  : est la dérivée partielle de la température par rapport au temps (variation temporelle)
- $\partial^2 T / \partial x^2$  : est la dérivée partielle seconde de la température par rapport à la coordonnée x (variation spatiale)

- $S(x, t)$  : est le taux de génération de chaleur interne au matériau en  $[W/m^3]$

Cette équation décrit comment la température évolue dans le temps ( $\partial T / \partial t$ ) dans une direction seulement, la longue de la coordonnée  $x$  en raison de la conduction thermique ( $\alpha * \partial^2 T / \partial x^2$ ) à travers le matériau, ainsi que de la présence d'une source interne de chaleur ( $S(x, t)$ ).

La loi de Fourier que vous avez mentionnée auparavant est une forme spécifique du terme de conduction thermique ( $\alpha * (\partial^2 T / \partial x^2)$ ) dans cette équation. Elle est basée sur l'observation que le flux de chaleur ( $Q$ ) est proportionnel au gradient de température ( $\partial T / \partial x$ ) et à la diffusivité thermique ( $\alpha$ ) du matériau, avec une surface de contact ( $A$ ) donnée.

Dans l'équation de conduction thermique, la source de chaleur interne  $S(x, t)$  peut être utilisée pour représenter les pertes par effet Joule [2], ou d'autres sources de génération de chaleur à l'intérieur de la paroi solide

## 2) Équation de conduction thermique tridimensionnelle (3D)

L'équation de conduction thermique tridimensionnelle (3D) décrit la propagation de la chaleur dans un matériau en prenant en compte les variations spatiales dans trois dimensions. Elle peut être formulée de la manière suivante :

$$\partial T / \partial t = \alpha * (\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2) + S(x, y, z, t) \quad (I.4)$$

Où :  $\alpha = k / (\rho C p)$

- $\partial^2 T / \partial x^2, \partial^2 T / \partial y^2, \partial^2 T / \partial z^2$  : sont les dérivées partielles secondes de la température par rapport aux coordonnées  $x, y$  et  $z$  respectivement (variations spatiales)
- $S(x, y, z, t)$  : est le taux de génération de chaleur interne au matériau, en  $[W/m^3]$ .

Cette équation prend en compte les variations de température dans les trois directions spatiales ( $x, y, z$ ) et décrit comment la température évolue dans le temps ( $\partial T / \partial t$ ) en raison de la conduction thermique ( $\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2$ ) à travers le matériau, ainsi que de la présence d'une source interne de chaleur ( $S(x, y, z, t)$ ).

Il convient de noter que cette équation de conduction thermique tridimensionnelle est plus complexe à résoudre analytiquement que l'équation en une dimension, et elle nécessite souvent l'utilisation de méthodes numériques pour obtenir des solutions précises.

#### **I.2.3.1.4. Les Paramètres qui influent sur la conduction thermique**

Comprendre et maîtriser le transfert de chaleur dans les matériaux est essentiel pour concevoir des systèmes thermiques efficaces. Nous nous concentrons sur l'analyse du transfert thermique en mettant l'accent sur les propriétés des matériaux qui influencent cette dynamique.

La conduction thermique est influencée par plusieurs caractéristiques des matériaux. Ces caractéristiques déterminent la capacité d'un matériau à conduire la chaleur et sont essentielles pour comprendre et prédire la conduction thermique dans diverses applications. Parmi ces caractéristiques, on peut citer : Conductivité thermique, Chaleur spécifique, masse volumique.

##### **1) Conductivité thermique**

La conductivité thermique est une caractéristique propre à chaque matériau qui désigne sa capacité à laisser passer la chaleur ou, au contraire, à l'isoler. Cette propriété physique est indépendante de la forme du matériau et est exprimée en watts par mètre par kelvin ( $W/m \cdot ^\circ C$ ). Elle représente la quantité de chaleur transférée à travers un matériau d'un mètre d'épaisseur, pour une différence de température entre ses deux faces. Ainsi, une conductivité thermique élevée indique que le matériau permettra un transfert de chaleur plus efficace. Cette caractéristique est d'une importance fondamentale dans la conception de matériaux et de systèmes où le contrôle et l'optimisation du transfert de chaleur sont nécessaires.

Dans les structures poreuses, la conductivité thermique dépend de la taille, de la forme et de la distribution des pores, ainsi que de la conductivité thermique du matériau solide et du fluide présent dans les pores. la conductivité thermique effective est influencée par la conductivité thermique du matériau solide et celle du fluide présent dans les pores.

##### **2) Chaleur spécifique**

La chaleur spécifique, également appelée capacité thermique massique, est une grandeur physique qui mesure la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une unité de masse d'un matériau d'une certaine quantité de degrés Celsius (ou Kelvin). Elle représente la capacité d'un matériau à absorber ou à libérer de la chaleur sans subir de changement d'état. Les matériaux ayant une chaleur spécifique élevée nécessitent plus de chaleur pour augmenter leur température, ce qui peut affecter la conduction thermique.



La chaleur spécifique est une propriété intrinsèque de chaque matériau et dépend de sa composition et de sa structure. Elle est exprimée en joules par kilogramme par degré Celsius ( $\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ )

### 3) Densité

La densité est la masse d'un matériau par unité de volume. Elle est exprimée en kilogrammes par mètre cube ( $\text{kg/m}^3$ ). Les matériaux denses ont généralement une meilleure conduction thermique que les matériaux moins denses, car ils ont plus de particules par unité de volume, ce qui facilite le transfert de chaleur

Table I.1 Propriétés thermiques de différents produits solides

Materieux	Temperature (en $^{\circ}\text{C}$ )	Densité (en $\text{kg/m}^3$ )	Chaleur massique (en $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ )	Conductivité thermique (en $\text{w/m}\cdot\text{K}$ )
<b>Aluminium</b>	20	2700	0.900	203-230
<b>Acier</b>	20	7801	0.473	45
<b>Cuivre</b>	20	8954	0.383	386
<b>Étain</b>	20	7304	0.227	61
<b>Plomb</b>	20	1137	0.130	35
<b>Titane</b>	20	4500	0.523	21.9

#### I.2.3.2. Convection

La convection est en effet un mécanisme important de transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide. Elle se produit lorsque le mouvement des particules du fluide permet le transport de chaleur. Ce mouvement peut être causé par des différences de densité dues à des variations de température (convection naturelle) ou par des forces externes telles qu'un ventilateur ou une pompe (convection forcée). La convection naturelle est souvent associée aux courants de convection créés par des différences de densité causées par des variations de température. La convection forcée implique l'utilisation d'une source externe, telle qu'un ventilateur ou une pompe, pour générer un mouvement du fluide. Cela peut être utilisé pour augmenter le transfert de chaleur dans un système en forçant le fluide à circuler et à échanger de la chaleur avec une surface solide. La convection permet un transfert de chaleur plus efficace que la conduction seule, car elle implique à la fois le transport d'énergie thermique et le déplacement de matière chaude vers des régions plus froides. Cela permet un

mélange plus rapide des températures et une augmentation globale du transfert de chaleur. La densité du flux thermique  $q$  est donnée par la loi de Newton [2] :

$$q = h * (T_f - T) \quad (I.5)$$

Où :

- $q$  : est la densité du flux thermique en watts par mètre carré, [W/m<sup>2</sup>]
- $h$  : est le coefficient de transfert de chaleur convectif (en watts par mètre carré-kelvin, [W/m<sup>2</sup>·K])
- $T_f$  : est la température du fluide à la surface en kelvins, [K]
- $T$  : est la température de référence du fluide environnant en kelvins, [K].

### **I.2.3.3. Rayonnement**

Le rayonnement est le transfert d'énergie thermique sous forme d'ondes électromagnétiques, principalement des ondes infrarouges. Contrairement à la conduction et à la convection, le rayonnement ne nécessite pas de matière pour se propager et peut se produire dans le vide. Le rayonnement est émis par tous les objets en fonction de leur température et est absorbé par les objets environnants, ce qui entraîne un échange d'énergie thermique.

Dans les structures poreuses, le rayonnement peut être absorbé, réfléchi ou transmis à travers les pores, en fonction de la taille, de la forme et de la distribution des pores, ainsi que des propriétés optiques des matériaux constitutifs.

## **I.2.4. Notions sur les Structures poreuses**

### **I.2.4.1. Introduction**

Le concept de métaux artificiels poreux et cellulaires est apparu pour la première fois au début des années 1970[3]. Les structures poreuses sont des matériaux qui présentent des vides ou des pores dans leur structure. Ces pores peuvent être non connectés ou interconnectés, et ils existent sous différentes formes, tailles et distributions, à différentes échelles allant du millimètre au nanomètre et jusqu'à l'échelle macroscopique. Les matériaux poreux peuvent être d'origine naturelle ou synthétique.

Parmi les structures poreuses, on trouve les mousses métalliques et les nids d'abeilles. Les métaux poreux se distinguent par leur rigidité spécifique élevée, leur capacité d'absorption d'importantes quantités d'énergie, ainsi que leur potentiel de contrôle du bruit, d'amortissement mécanique et d'isolation thermique [4]. En raison de leur caractère structurel particulier, ils offrent de nombreuses combinaisons intéressantes de propriétés physiques et mécaniques, et sont largement utilisés dans des domaines tels que l'aérospatiale, le génie civil, le génie énergétique, etc. [5]

Une approche étroitement liée a déjà rencontré un succès notable dans l'industrie aéronautique et spatiale, grâce à l'utilisation de structures hexagonales en nid d'abeille comme âmes de structures sandwich. Au cours des dernières années [3], on a également analysé le transfert de chaleur transversal dans une structure en nid d'abeille remplie d'un liquide ou d'un gaz, en considérant ces structures comme des milieux poreux bidimensionnels à cellules fermées [6].

Les mousses poreuses peuvent être utilisées dans des environnements où des températures et des contraintes élevées sont impliquées. Par exemple, elles sont utilisées dans les tuyères de fusée refroidies par transpiration, les systèmes de refroidissement, les chambres de combustion des turbines à gaz et à vapeur, ainsi que pour la protection thermique des gaz d'échappement des avions [5].

Il est important de noter que les propriétés des structures poreuses dépendent de la morphologie des pores et l'épaisseur de structure poreuse. La conductivité thermique d'un matériau poreux ne dépend pas seulement de la porosité, mais aussi de la structure poreuse [7]. Ainsi, les propriétés des structures poreuses peuvent être modifiées en modifiant ces paramètres.

#### **I.2.4.2. La morphologie des pores**

La morphologie des pores dans les structures poreuses est une étude complexe, car elle dépend de nombreux facteurs tels que le matériau, la méthode de fabrication et les conditions environnementales. Voici quelques aspects clés de la morphologie des pores dans les structures poreuses

- 1) Porosité :** rapport du volume poreux total  $V_p$  au volume apparent  $V$  de la particule [8]. Elle est généralement exprimée en pourcentage et peut varier considérablement en

fonction du type de matériau et de la méthode de fabrication. Une porosité élevée peut améliorer les propriétés d'absorption et de transport des structures poreuses.

$$\varepsilon = V_p/V \quad (I.6)$$

- 2) Taille des pores :** La taille des pores est un paramètre essentiel pour déterminer les propriétés d'une structure poreuse. Les pores peuvent être classés en trois catégories en fonction de leur taille : micropores (diamètre inférieur à 2 nm), méso pores (diamètre entre 2 et 50 nm) et macropores (diamètre supérieur à 50 nm [8]).
- 3) Forme des pores :** La forme des pores peut varier considérablement, allant de sphérique, cylindrique, cavités et fenêtres, à des formes plus complexes et irrégulières (IUPAC, 1994). La forme des pores peut influencer la connectivité, la perméabilité et la tortuosité des structures poreuses.
- 4) Distribution des pores :** La distribution des pores fait référence à la manière dont les pores sont répartis dans la structure poreuse. Une distribution uniforme des pores peut améliorer les propriétés mécaniques et de transport, tandis qu'une distribution inégale peut entraîner des contraintes locales et une dégradation des performances.
- 5) Connectivité des pores :** La connectivité des pores est un autre aspect important de la morphologie des pores. Elle fait référence à la manière dont les pores sont interconnectés les uns aux autres. Une connectivité élevée des pores peut faciliter le transport des fluides et des gaz à travers la structure poreuse.
- 6) Nombre de pores :** Le nombre de pores peut varier considérablement en fonction du type de matériau, de sa composition et de son processus de formation. Certains matériaux peuvent avoir un petit nombre de gros pores, tandis que d'autres peuvent avoir un grand nombre de pores plus petits. La taille des pores peut également influencer la conductivité. Des pores plus larges peuvent permettre un flux plus facile des fluides et des charges électriques, tandis que des pores plus étroits peuvent entraver le mouvement et réduire la conductivité.

### I.3. Travaux relatifs au domaine

L'étude du transfert thermique au sein des structures poreuses est un domaine de recherche passionnant qui se concentre sur la compréhension et la modélisation des mécanismes de transfert de chaleur à travers des matériaux poreux. Ces matériaux,

caractérisés par leur structure complexe et leur porosité, se trouvent dans de nombreuses applications industrielles et naturelles. Les travaux de recherche dans ce domaine couvrent un large éventail d'aspects, tels que l'étude de la conductivité thermique des matériaux poreux, la modélisation des transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement, ainsi que l'influence des propriétés physiques et géométriques des structures poreuses sur le transfert thermique.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés pour approfondir notre compréhension du transfert thermique au sein des structures poreuses. Parmi ces travaux, on peut citer :

**J. Francl et W. D. Kingery (1954)**, ont examiné l'effet de la porosité sur la conductivité thermique des matériaux céramiques. Ils ont passé en revue les théories et les données expérimentales précédentes sur le sujet, ont compris l'influence de la taille, de la forme, de l'orientation et de l'émissivité des pores. Ils ont présenté également de nouvelles données expérimentales sur l'effet des pores isométriques et anisométriques sur la conductivité thermique de l'alumine, du graphite et du nickel. Les résultats montrent que la conductivité thermique des échantillons varie avec la porosité et la température, et que les données peuvent être représentées par les théories de Loeb ou Russell. Les auteurs concluent que l'équation de Loeb est préférable pour prédire la conductivité thermique dans les matériaux poreux. Ils ont discuté également de l'applicabilité de ces relations à des problèmes pratiques et de l'importance de considérer la composition et la microstructure des systèmes hétérogènes. Enfin, ils ont fourni une table et des graphiques de la conductivité thermique de différents matériaux oxydés à des températures allant de 100°C à 1800°C.

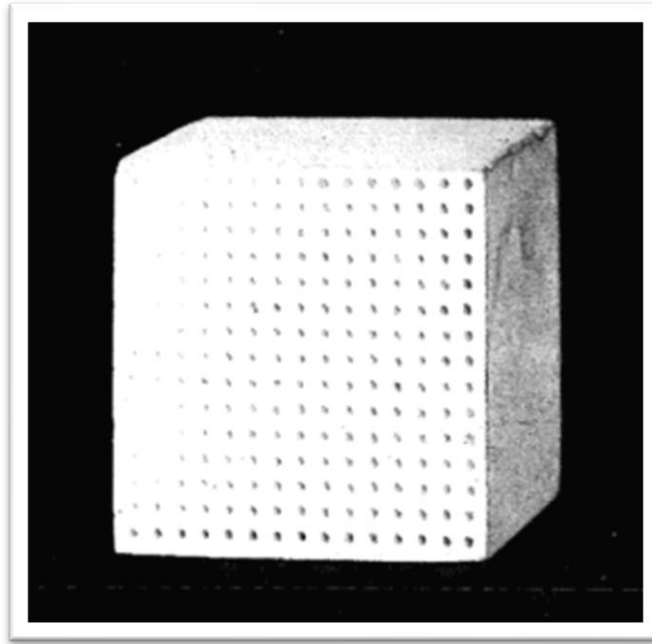


Figure I-1 Représentation schématique du modèle physique [9].

**Lu, G.-Y, et al (2014)**, ont étudié les propriétés thermiques de la mousse d'aluminium à cellules fermées avec des pores circulaires. Ils ont examiné les effets de la porosité, de la taille des cellules et de la distribution des pores sur la conductivité thermique apparente. De plus, ont également analysé les effets de l'air présent dans les pores sur les propriétés thermiques. Ils ont étudié numériquement les propriétés thermiques de la mousse d'aluminium à cellules fermées, en analysant théoriquement les effets de la distribution des pores circulaires sur ces propriétés. En négligeant la convection et le rayonnement, ils ont construit deux types de modèles en éléments finis pour étudier l'effet de la taille des pores et de la porosité. Dans l'un des modèles, les pores avaient la même taille mais une porosité différente, tandis que dans l'autre modèle, la porosité était la même mais les tailles des pores différaient. Ils ont utilisé un solveur d'analyse thermique en régime permanent, où seules les conditions aux limites devaient être fournies : une température constante de 40 °C a été définie sur la limite supérieure et de 30 °C sur la face inférieure. Les autres côtés ont été définis comme des limites adiabatiques.

Pour obtenir la conductivité thermique effective à partir des résultats de la simulation et de l'intensité du flux de chaleur, ils ont utilisé le théorème de Fourier. Les résultats de la simulation ont montré que la conductivité thermique apparente augmentait linéairement avec l'augmentation de la porosité, tandis que la taille des cellules et la distribution des pores

avaient des effets négligeables sur les propriétés thermiques. En comparaison, la conductivité thermique de l'air avait un léger effet sur les propriétés thermiques de la mousse d'aluminium dans le contexte de pores de petite taille.

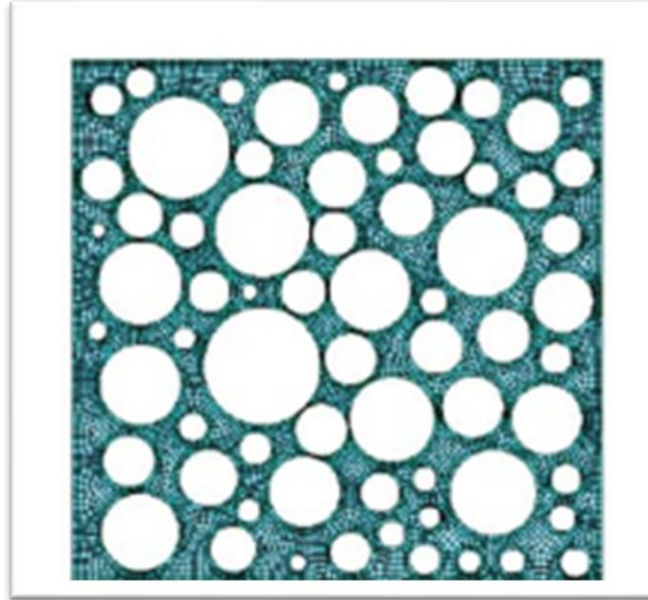


Figure I-2 Représentation schématique du modèle physique [5].

**Dang et al (2017)**. Ont étudié la conduction de la chaleur dans les milieux poreux caractérisés par une géométrie fractale. La géométrie fractale (mouvement brownien fractionnaire - FBM) est introduite pour caractériser la répartition des pores. Le matériau est représenté par une cavité 2D carrée de longueur ( $L$ ) avec des pores carrés : la zone noire représente la phase solide continue tandis que la zone blanche est la phase fluide discrète, comme le montre la figure. Le domaine de calcul est composé de phases solides auxiliaires situées avant et après le milieu poreux ainsi que du matériau poreux fractal. La longueur des phases solides auxiliaires est ( $L_1$ ). La condition aux limites de flux de chaleur constant est imposée sur le côté gauche de la matrice solide auxiliaire, plutôt que sur les milieux poreux. La phase solide auxiliaire est solide avec les mêmes propriétés thermiques que la matrice solide du matériau poreux fractal. Sur la base de la caractérisation fractale, un modèle mathématique de la conduction thermique est présenté pour étudier les comportements de la conduction thermique. La conductivité thermique effective est évaluée afin de déterminer le rôle de la structure des pores sur la distribution de la température et le flux de chaleur pour le matériau poreux fractal. De plus, les effets de la dimension fractale, de la porosité et du rapport de conductivité thermique entre la matrice solide et la phase fluide ( $k_s/k_f$ ) sur la

conductivité thermique effective sont étudiés. Les résultats indiquent que la structure des pores a un effet important sur la conduction de la chaleur à l'intérieur d'un matériau poreux. L'augmentation de la porosité diminue la conductivité thermique. Même lorsque la porosité reste constante, la conductivité thermique effective est affectée par les dimensions fractales du matériau poreux. Pour les matériaux poreux, la capacité de conduction thermique diminue avec l'augmentation de la dimension fractale. De plus, la conduction thermique en phase fluide à travers les pores est efficace dans les matériaux poreux uniquement lorsque  $k_s/k_f < 50$ . La structure des pores dépend principalement de la conductivité thermique de la matrice solide.

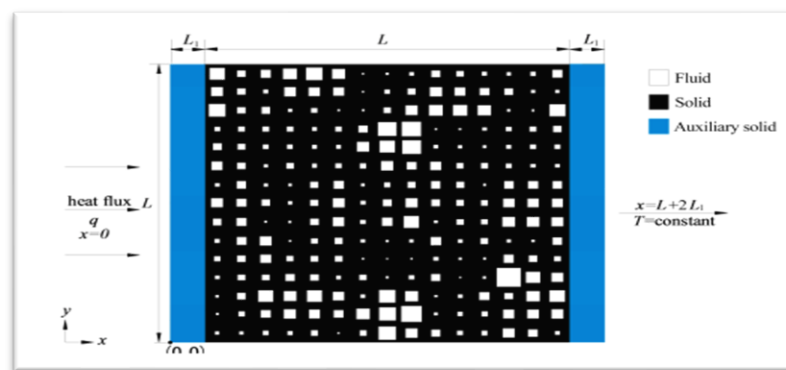


Figure I-3 Représentation schématique du modèle physique [7].

**C. Wangont et al (2019)**, ont fait une étude sur le transfert de chaleur dans des milieux poreux à cellules fermées en conditions de non-équilibre thermique local. Les auteurs comparent les températures transitoires entre les approches à l'échelle des pores et à l'échelle volumique et valident l'hypothèse d'équilibre thermique local pour l'état instationnaire. Ils discutent également du coefficient de transfert de chaleur inter faciale pour les milieux poreux à cellules fermées. L'étude est importante pour comprendre le transfert de chaleur transitoire dans les matériaux poreux à cellules fermées, qui ont des applications dans des industries telles que l'isolation en mousse métallique et les matériaux d'isolation en plastique. Cette étude est la première à aborder les milieux poreux à cellules fermées d'un point de vue de non-équilibre thermique local.

L'étude utilise des simulations numériques pour examiner le transfert de chaleur par convection naturelle dans des milieux poreux à cellules fermées remplis d'eau et d'air. Les



méthodes à l'échelle des pores et à l'échelle volumique sont utilisées pour résoudre les équations gouvernant le transfert de chaleur. Le coefficient de transfert de chaleur interfaciale est calculé à partir de l'étude à l'échelle des pores et utilisé pour la solution des équations à l'échelle volumique. Les résultats montrent l'effet du nombre de Rayleigh à l'échelle des pores sur les distributions de température et de vitesse. L'étude fournit un outil utile pour comprendre le transfert de chaleur dans les milieux poreux à cellules fermées.

L'étude examine également le transfert de chaleur transitoire à travers des milieux poreux à cellules fermées en utilisant des simulations numériques. Les résultats des approches à l'échelle volumique et à l'échelle des pores sont comparés et les effets de la porosité et du fluide de travail (eau et air) sur le comportement thermique sont examinés.

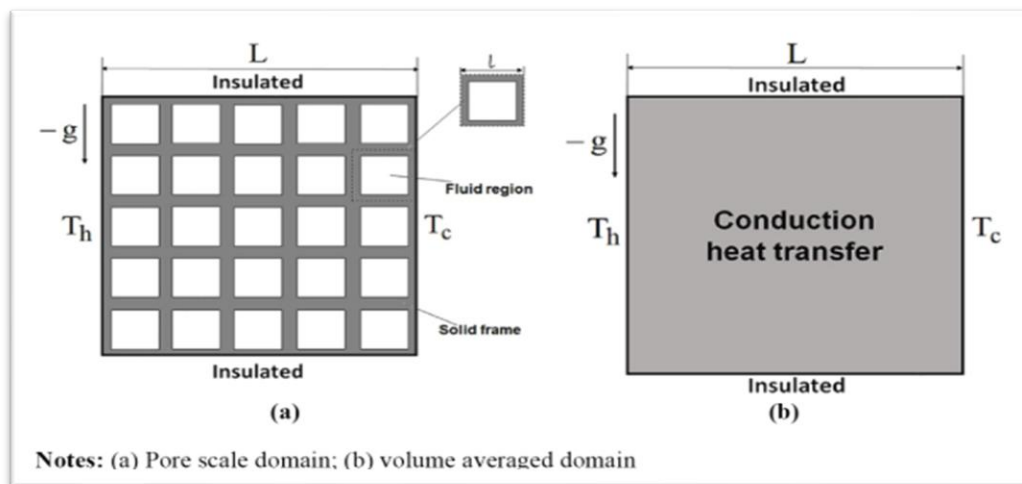


Figure I-4 Représentation schématique du modèle physique [6].

**X. Zhang et al (2022)**, présenté une méthode de conception de structures poreuses à gradient de porosité basée sur la méthode de Voronoi par le pavage et étudie leur performance thermique par analyse par éléments finis. Trois structures Voronoi avec différents gradients et des structures régulières correspondantes ont été conçues, et la porosité a été contrôlée en modifiant le rayon des piliers. La conductivité thermique effective de la structure à gradient spatial de Voronoi était inférieure à celle de la structure régulière, et la conductivité thermique effective de la structure diminuait progressivement avec l'augmentation de la porosité. Une méthode pour prédire les conductivités thermiques effectives de matériaux poreux aléatoires tridimensionnels de Voronoi a également été proposée sur la base du principe de superposition de la résistance thermique. Elles ont discuté de la conception et de la simulation de matériaux poreux aléatoires de Voronoi à gradient

tridimensionnel pour des applications de contrôle thermique. La conductivité thermique effective des matériaux poreux avec différentes porosités, structures de gradient et orientations est obtenue par simulation par éléments finis. Elles ont présenté également un pack de batterie construit sur la plate-forme Grass-Hopper pour calculer les conductivités thermiques effectives des structures poreuses à base de piliers. Les résultats montrent que l'orientation de gradient des matériaux poreux a une influence sur leurs propriétés. L'étude a examiné l'effet de la structure de gradient sur la conductivité thermique effective de matériaux poreux aléatoires de Voronoi tridimensionnels. Les résultats de la simulation ont été vérifiés en utilisant l'aluminium 6101 comme matériau de base. Les résultats ont montré que la conductivité thermique effective de la structure à gradient était inférieure à celle de la structure sans gradient, et que la porosité de la structure affectait ses performances. L'étude a également constaté que la conductivité thermique de la structure poreuse aléatoire de Voronoi à gradient tridimensionnel était anisotrope.

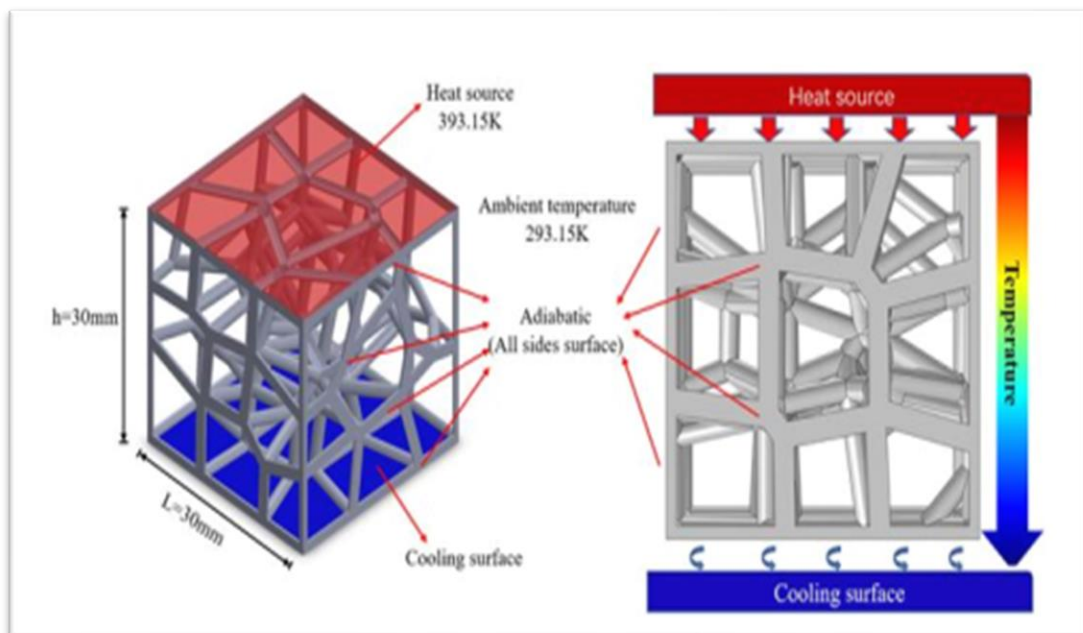


Figure I-5 Représentation schématique du modèle physique [11]

**V T. Pham et Te Hua. Fang (2022)**, ont fait une étude sur les propriétés mécaniques et thermiques des membranes de nitrure de bore bidimensionnel nano-poreux à l'aide de simulations de dynamique moléculaire. Les effets de la porosité et de la température sur les propriétés mécaniques et thermiques de h-BN sont étudiés, ainsi que le mécanisme de rupture lors du processus de tension. Les résultats montrent que la conductivité thermique des

membranes de h-BN est considérablement réduite par la nano-porosité, et que plus la porosité est élevée, plus la conductivité thermique est faible. Les propriétés mécaniques des membranes de h-BN avec différentes porosités ont également été étudiées sous tension. Elles ont fait également d'autres études sur les propriétés mécaniques et thermiques du nitrure de bore hexagonal (h-BN) et de ses applications en nanotechnologie. Enfin, elles soulignent l'importance de l'ingénierie de la taille des grains pour adapter les propriétés de transport thermique de h-BN.

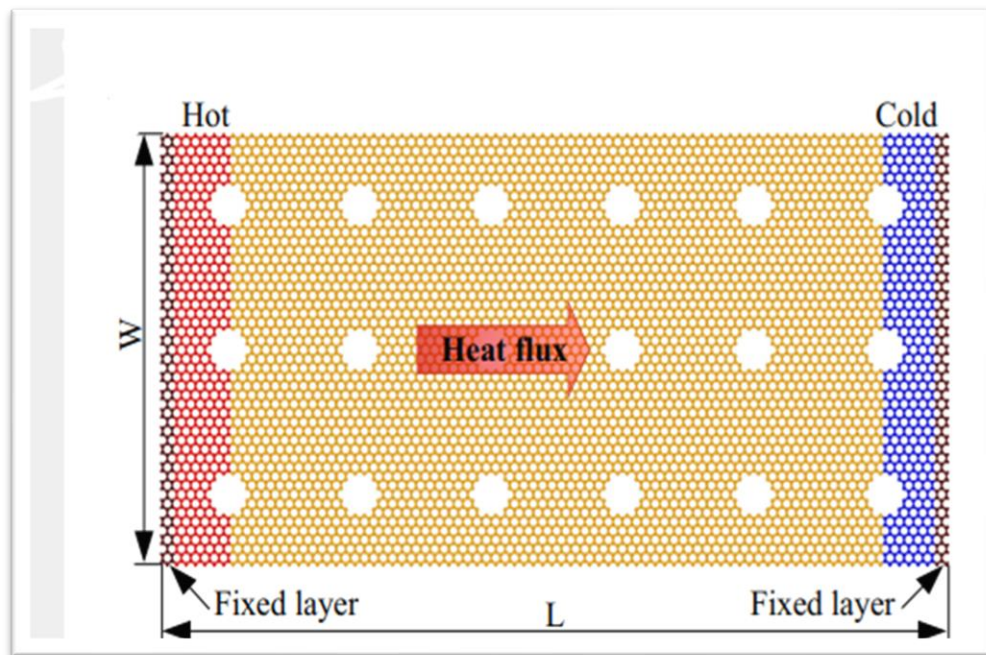


Figure I-6 Représentation schématique du modèle physique [10].

#### I.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en lumière les concepts clés et les principes fondamentaux liés à l'étude des phénomènes thermiques dans les matériaux poreux. Assi, ce chapitre a jeté les bases pour une exploration plus approfondie des analyses et investigations thermiques dans les structures poreuses. Les connaissances acquises ici serviront de point de départ pour les chapitres suivants, où nous examinerons des cas spécifiques et des applications pratiques, afin de mettre en œuvre les concepts et les méthodes présentés dans ce chapitre généralités.

**CHAPITRE II**  
**SIMULATION PAR NASTRAN /PATRAN**

## CHAPITRE II. SIMULATION PAR NASTRAN /PATRAN

### II.1. Introduction :

La simulation numérique est devenue un outil indispensable dans le domaine de l'ingénierie, offrant la capacité d'analyser et de prédire le comportement des structures et des systèmes complexes. Elle consiste à exécuter des programmes informatiques sur des ordinateurs afin de simuler des phénomènes physiques réels tels que l'écoulement de fluides, le transfert thermique, etc.

Les simulations numériques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques, souvent basés sur des techniques telles que les éléments finis ou les volumes finis. Elles permettent de réduire les risques et d'éviter les coûts associés à une série d'essais réels. Parmi les logiciels de simulation les plus répandus, Patran et Nastran qui sont deux logiciels développés par MSC Software, patran est un logiciel de pré et post-traitement qui offre une interface graphique intuitive pour la modélisation, l'analyse et la visualisation des résultats de simulation. Il permet de créer des modèles géométriques, d'appliquer des charges et des conditions aux limites, et de définir les propriétés des matériaux. Patran est compatible avec une large gamme de solveurs, dont Nastran, qui est l'un des solveurs les plus renommés pour l'analyse par éléments finis.

Nastran est un solveur d'analyse par éléments finis (FEA) qui permet d'effectuer des simulations dans divers domaines tels que la résistance des matériaux, la dynamique, la thermique, l'acoustique et l'aéroélasticité. Nastran est particulièrement apprécié pour sa robustesse, sa précision et sa capacité à traiter des problèmes de grande envergure.

L'utilisation conjointe de Patran et Nastran présente un intérêt majeur pour les ingénieurs et chercheurs, car elle offre une solution complète pour la modélisation, l'analyse et l'optimisation des structures et des systèmes mécaniques. Grâce à ces outils, il est possible de réduire les coûts et les délais de développement, d'améliorer la performance des produits et de garantir leur fiabilité et leur sécurité. De plus, la simulation avec Patran et Nastran permet de limiter le recours aux essais physiques coûteux et chronophages, tout en offrant une meilleure compréhension des phénomènes complexes et des interactions entre les différents éléments d'un système.

Dans ce chapitre, pour mieux comprendre les analyses thermiques nous allons décrire la méthodologie de simulation avec Nastran/ Patran, Dans ce contexte, nous allons présenter les étapes nécessaires pour réaliser une simulation numérique en premier lieu pour une plaque simple ensuite pour une plaque poreuse.

## II.2. Les étapes pour réaliser la simulation

Le processus de simulation généralement comprend trois étapes : le pré processus, le solveur (solver) et le post-traitement. Tel que Patran combine à la fois les fonctionnalités de pré et de post-traitement.

Nastran, quant à lui, est le programme de calcul. Il peut être directement exécuté à partir de la base de Patran, ce qui facilite l'analyse des modèles préparés dans Patran.

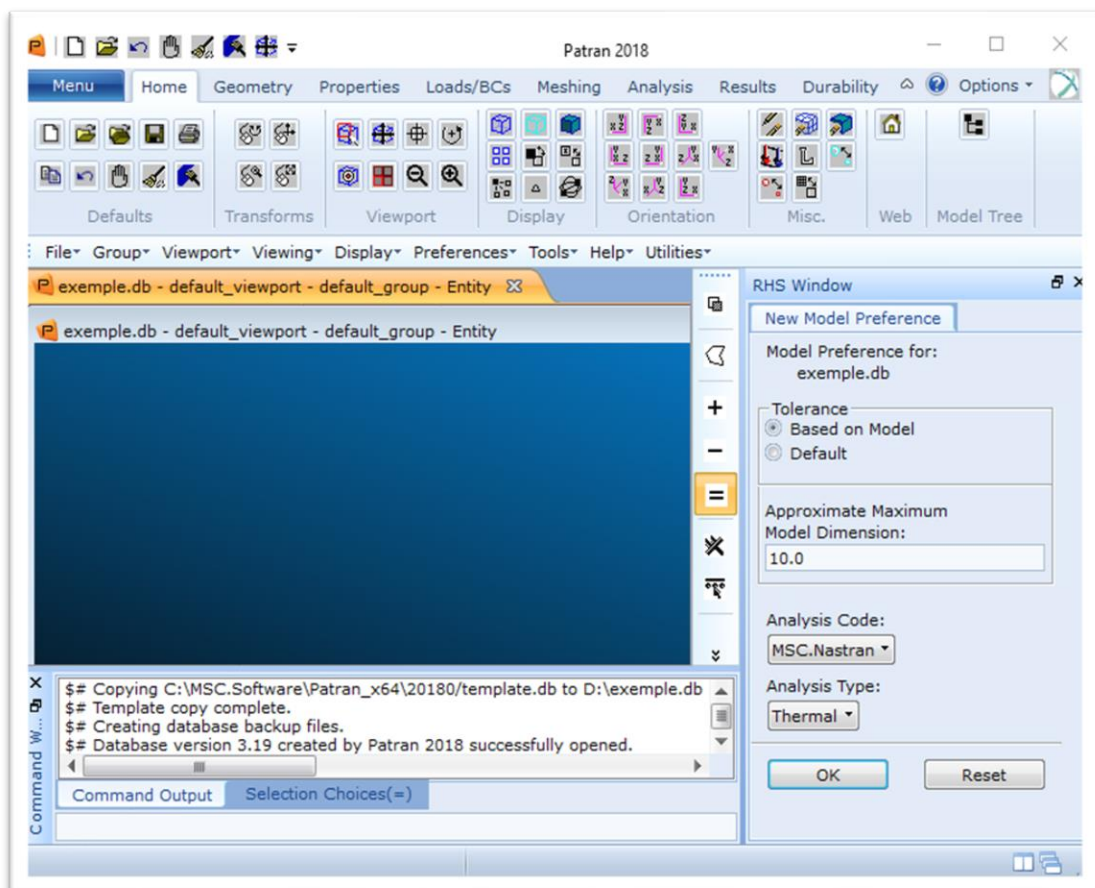


Figure II-1 . L'interface de Patran 2018

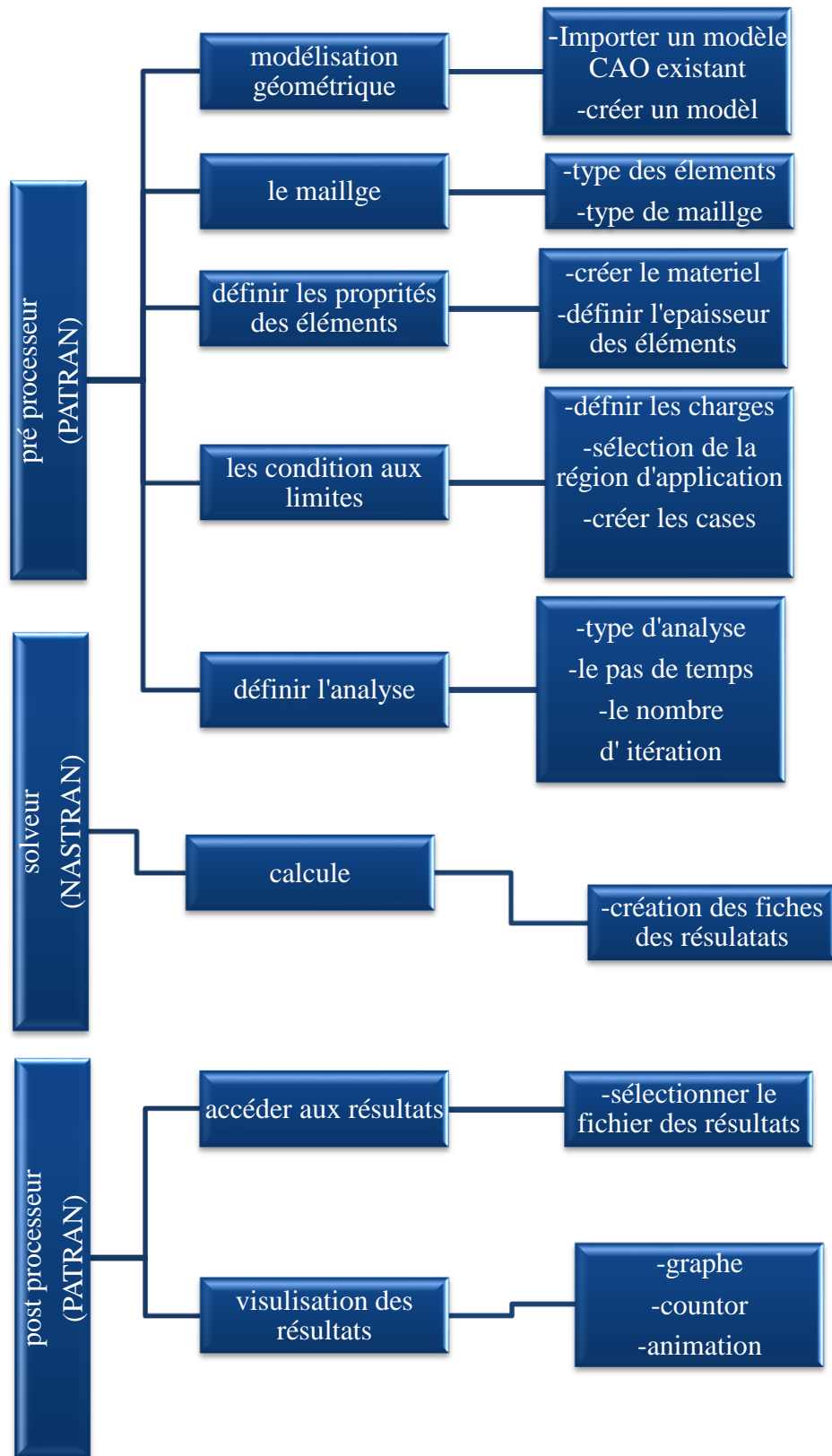


Figure II-2 Schématisation de la simulation par Patran/Nastran

### II.2.1. Géométrie

- 1) **Importer un modèle CAO existant** : Si vous avez déjà un modèle CAO existant, vous pouvez l'importer dans Patran en utilisant les formats de fichier standard tels que IGES, STEP, ou Parasol id. Une fois importé, vous pouvez effectuer des opérations de nettoyage et de réparation pour vous assurer que le modèle est correctement défini.
- 2) **Créer un nouveau modèle** : Si vous n'avez pas de modèle CAO existant, vous pouvez créer un nouveau modèle en utilisant les outils de modélisation de Patran, tels que les points, les lignes et les surfaces, pour construire votre modèle. Vous pouvez définir les coordonnées des points, les longueurs des lignes et les propriétés des surfaces selon vos besoins.
- 3) **Créer des groupes** : Vous pouvez créer des groupes de surfaces ou de volumes pour faciliter la définition des conditions aux limites et des propriétés matérielles. Les groupes peuvent être créés en sélectionnant des surfaces ou des volumes et en leur attribuant un nom.
- 4) **Vérifier la qualité du modèle** : Il est important de vérifier la qualité de votre modèle géométrique pour vous assurer qu'il est correctement défini. Vous pouvez utiliser les outils de vérification de qualité de Patran pour détecter les erreurs de modélisation telles que les intersections, les surfaces mal définies, etc...

### II.2.2. Le maillage

Divisez la géométrie en éléments finis en utilisant les outils de maillage de Patran. Avec ces étapes :

- 1) **Sélection du type d'élément** : Choisissez le type d'élément approprié pour votre analyse de transfert thermique. Les éléments peuvent être 1D (barres ou poutres), 2D (coques ou plaques) ou 3D (solides). Le choix dépend de la géométrie de votre modèle et du niveau de détail souhaité pour l'analyse.
- 2) **Définition des paramètres de maillage** : Avant de générer le maillage, définissez les paramètres de maillage, tels que la taille des éléments, la méthode de maillage (structuré ou non structuré) et les contraintes de qualité du maillage (par exemple, l'angle minimal et maximal entre les arêtes des éléments). Un maillage plus fin est généralement nécessaire dans les zones où les gradients de température sont élevés



ou où la géométrie est complexe. Cependant, un maillage trop fin peut augmenter le temps de calcul et la mémoire requise pour l'analyse.

- 3) **Générer le maillage** : Utilisez les outils de maillage de Patran pour créer le maillage sur la géométrie. Vous pouvez mailler des points, des lignes, des surfaces ou des solides, en fonction du type d'élément choisi. Voici quelques méthodes de maillage disponibles dans Patran :
  - **Maillage structuré** : Cette méthode crée un maillage régulier avec des éléments de forme quadrilatère (2D) ou hexaédrique (3D). Le maillage structuré est généralement plus rapide à générer et offre une meilleure qualité d'élément, mais il peut être difficile à appliquer sur des géométries complexes
  - **Maillage non structuré** : Cette méthode crée un maillage irrégulier avec des éléments de forme triangulaire (2D) ou tétraédrique (3D). Le maillage non structuré est plus flexible et peut s'adapter à des géométries complexes, mais il peut nécessiter plus de temps pour générer et présenter une qualité d'élément inférieure
  - **Maillage mixte** : Cette méthode combine les maillages structurés et non structurés pour tirer parti des avantages de chaque méthode. Par exemple, vous pouvez utiliser un maillage structuré dans les zones où la géométrie est simple et régulière, et un maillage non structuré dans les zones où la géométrie est complexe et irrégulière.
- 4) **Vérifications de la qualité du maillage** : Après avoir généré le maillage, utilisez les outils de diagnostic de Patran pour vérifier la qualité du maillage. Ces outils vous aident à identifier et à résoudre les problèmes potentiels, tels que les éléments déformés, les angles trop aigus ou obtus, ou les variations de taille d'élément trop importantes. Vous pouvez également visualiser le maillage et les éléments individuels pour évaluer leur qualité.
- 5) **Ajustez le maillage si nécessaire** : Si la qualité du maillage n'est pas satisfaisante, ajustez les paramètres de maillage et régénérez le maillage. Vous pouvez également utiliser les outils de modification de maillage de Patran pour déplacer, fusionner, diviser ou supprimer des nœuds et des éléments individuels.
- 6) **Maillage des configurations alternatives** : Si vous étudiez des géométries complexes telles que les structures en nid d'abeille, le logiciel Patran offre la possibilité de créer des maillages pour chaque composant de cette géométrie, puis de les assembler pour obtenir un maillage complet de cette forme géométrique complexe.

### II.2.3. Définition des matériaux et des propriétés des éléments

- 1) **Création du matériau** : Dans un premier temps, vous devez choisir le type de matériau souhaité (isotropique, orthotrope ou anisotrope) en sélectionnant l'objet correspondant (2D, 3D...). Ensuite, vous devez attribuer un nom au matériau et spécifier ses propriétés spécifiques.
- 2) **Création de la propriété de l'élément** : vous devez créer la propriété de l'élément en spécifiant l'objet correspondant (1D, 2D ou 3D) en fonction de la géométrie. Vous devez également donner un nom à la propriété. De plus, vous devez associer le matériau précédemment créé à la propriété de l'élément et spécifier l'épaisseur (dans le cas d'une géométrie 2D). Enfin, vous devez sélectionner la région d'application de la propriété, c'est-à-dire les parties spécifiques de la géométrie auxquelles la propriété s'applique.

### II.2.4. Définition des conditions aux limites

- 1) **Création des conditions aux limites** : Dans Patran, vous pouvez définir plusieurs types de conditions aux limites pour une analyse de transfert thermique, notamment : Température imposée, Flux de chaleur, convection, rayonnement.
- 2) **Sélection des régions** : Identifiez les entités géométriques (points, lignes, surfaces ou solides) auxquelles vous souhaitez appliquer les conditions aux limites.

Pour attribuer une condition aux limites à une entité géométrique, accédez au menu (Boundary Conditions) dans Patran. Sélectionnez le type de condition aux limites, les entités concernées et les valeurs appropriées (température, flux de chaleur, coefficient de convection, etc.). Vous pouvez également définir des conditions aux limites dépendantes du temps ou de la position pour simuler des scénarios plus complexes. Ainsi vous pouvez laisser d'ensemble des conditions dans un case pour solve plusieurs problèmes sur même model.

### II.2.5. Définition de l'analyse

- 1) **Configuration de l'analyse** : Sélectionnez le type d'analyse thermique à effectuer, par exemple, une analyse stationnaire ou transitoire.
- 2) **Définissez les paramètres de l'analyse** : tels que le nombre d'itérations, les critères de convergence et les pas de temps pour les analyses transitoires.

- 3) **Exécution de l'analyse(calcul)** : Lancez l'analyse thermique et attendez que le Nastran résolve le problème. Le temps de calcul dépendra de la complexité du modèle, du type d'analyse et des paramètres de résolution.

### II.2.6. Visualisations des résultats

Une fois l'analyse terminée, vous pouvez importer les résultats dans Patran pour les visualiser et les analyser. Les outils de post-traitement disponibles dans Patran vous permettent d'afficher les résultats de manière interactive.

Vous pouvez utiliser ces outils pour afficher des informations telles que les températures, les flux de chaleur, les gradients de température et d'autres paramètres d'intérêt. Les résultats peuvent être présentés sous forme d'animations, de graphiques de contours, de diagrammes, etc.

### II.3. Exemple 1 : Analyse instationnaire d'une plaque simple

Une plaque rectangulaire en aluminium de dimensions (0.3 × 0.2 m), avec une épaisseur de 0.02 m, est soumise à des conditions de température fixe. La température dans la frontière Nord et Sud de la plaque est maintenue à 20°C, tandis que sur les frontières East et West est maintenue à 270°C.

D'abord, vous devrez définir les préférences du modèle en thermal Analysis.

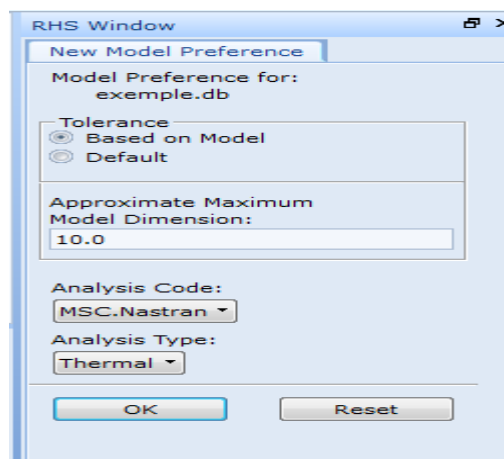


Figure II-3 Définition des préférences du model 1

Les figures II.4 à II.15 montrent la configuration dans le logiciel PATRAN pour la modélisation de cet exemple.

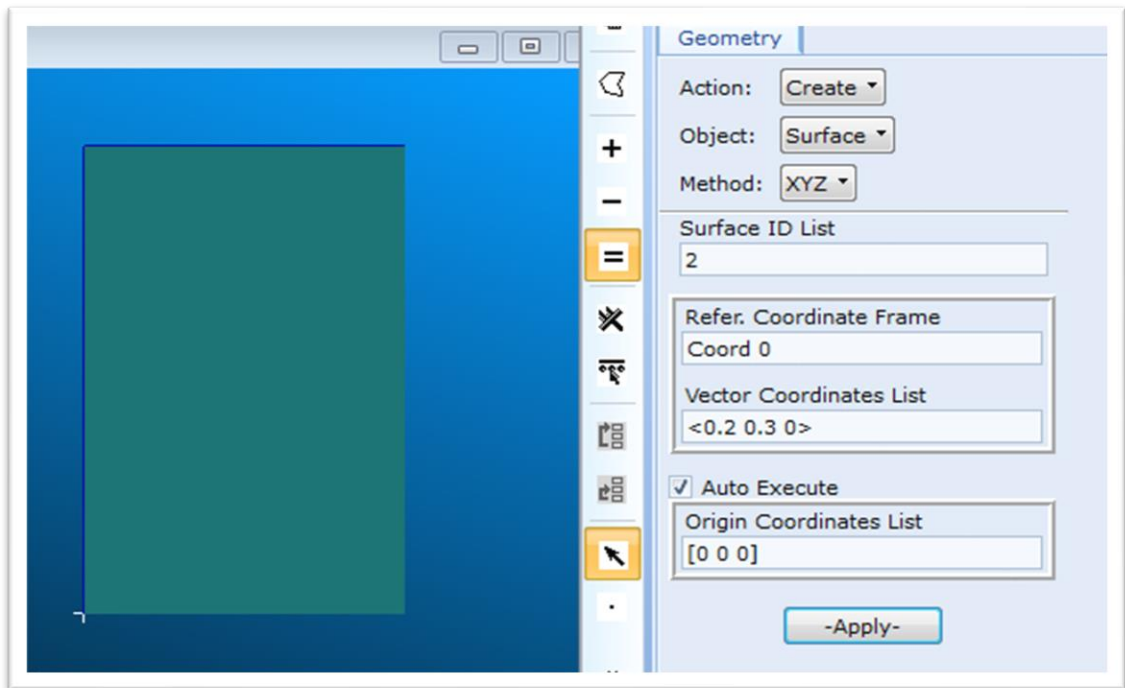


Figure II-4 La géométrie du model et la configuration nécessaire

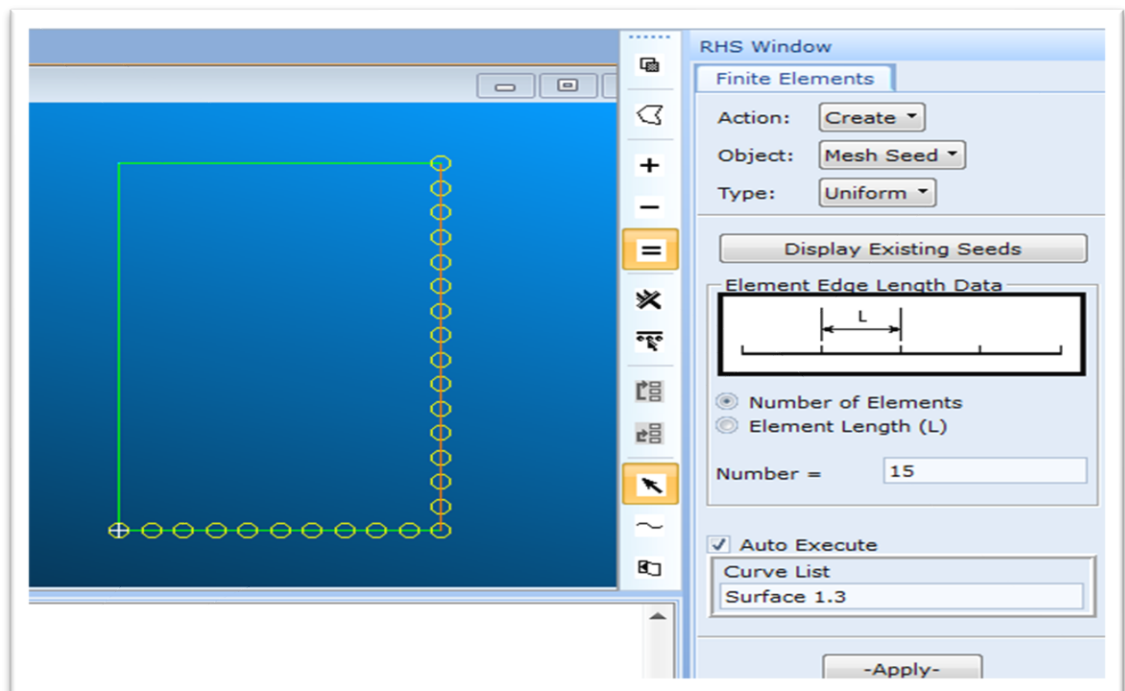


Figure II-5 Définition de la taille initiale des éléments du maillage.

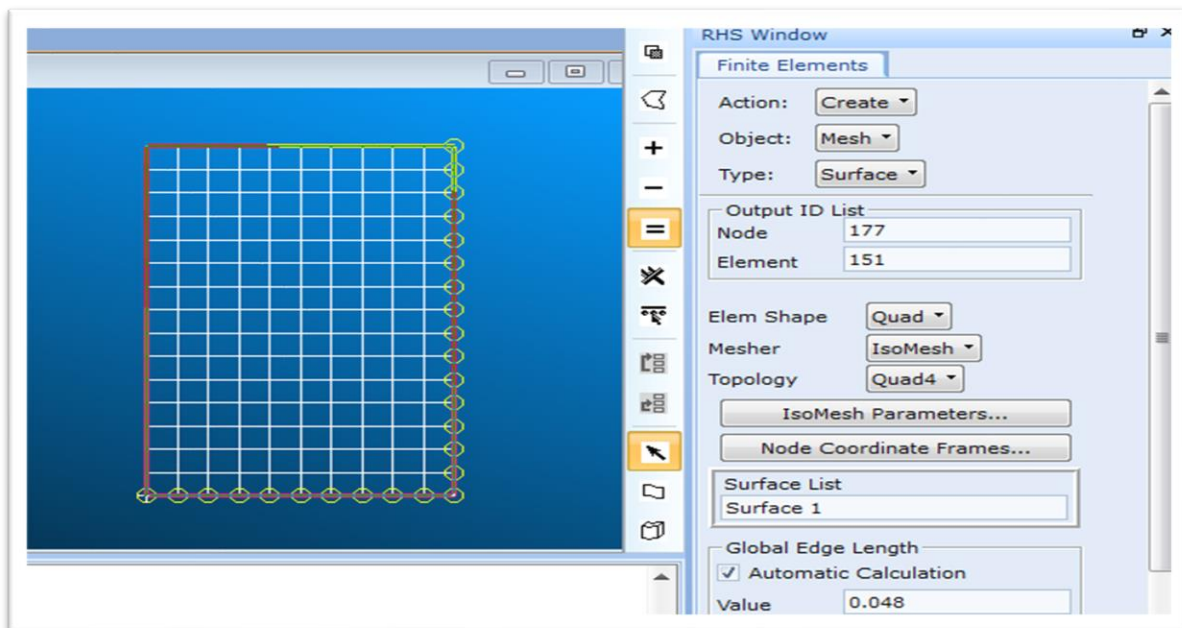


Figure II-6 Le maillage de géométrie avec le paramétrage de création.

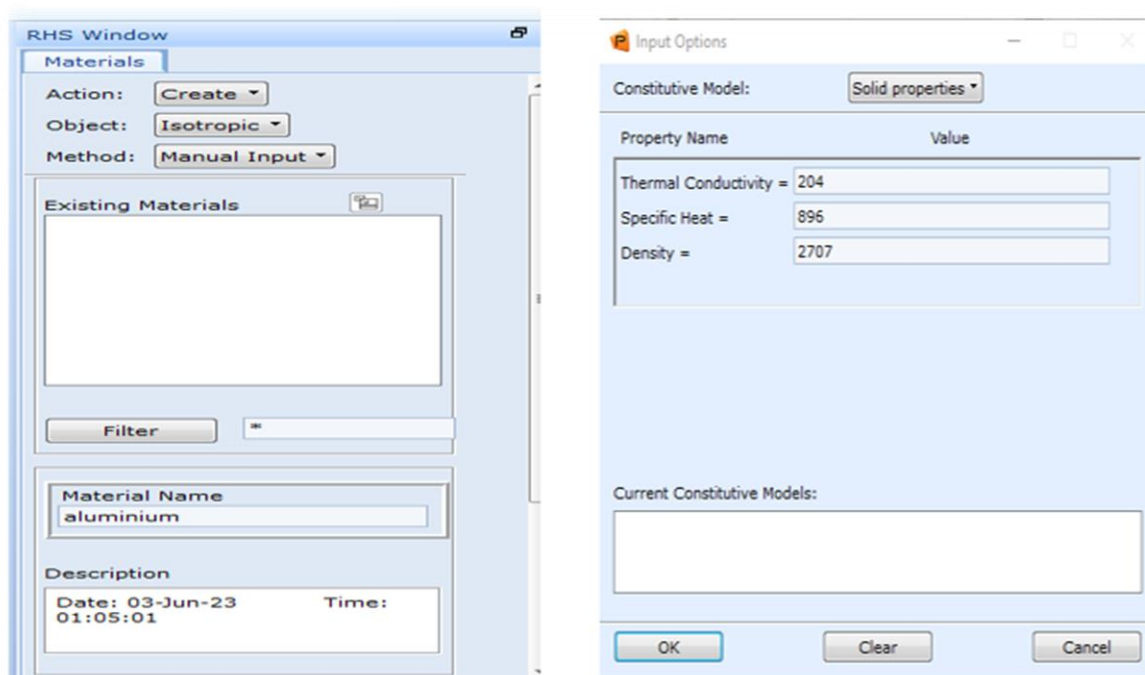


Figure II-7 Spécification des propriétés du matériau : (a) nommé le matériau aluminium (b) Définition de leurs propriétés.

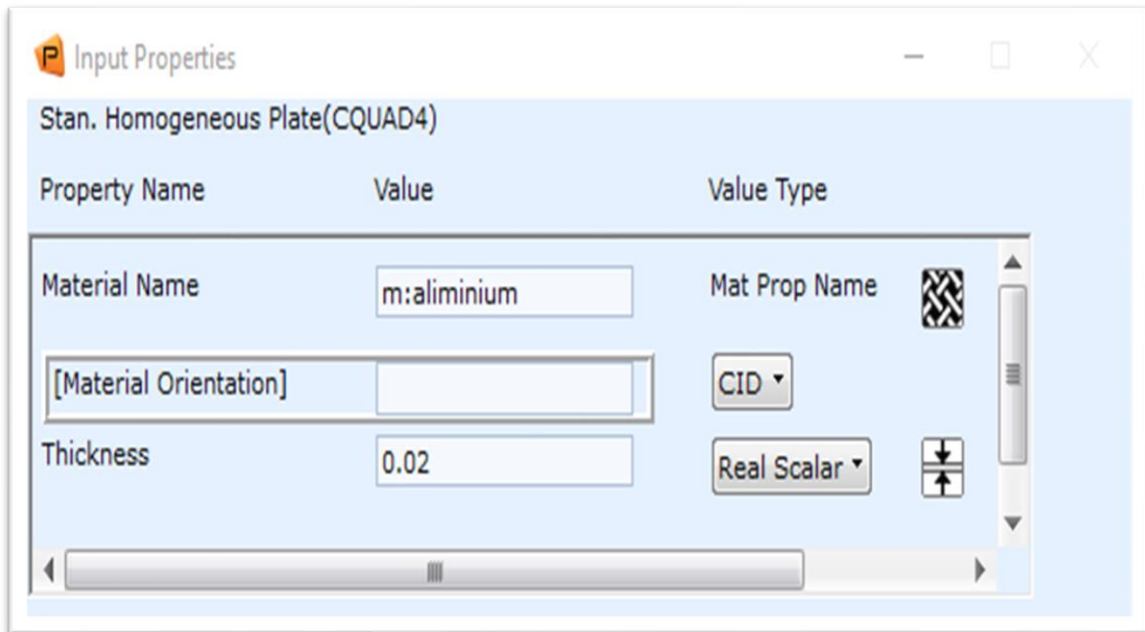


Figure II-8 Attribution des propriétés des éléments et spécification de leur épaisseur.

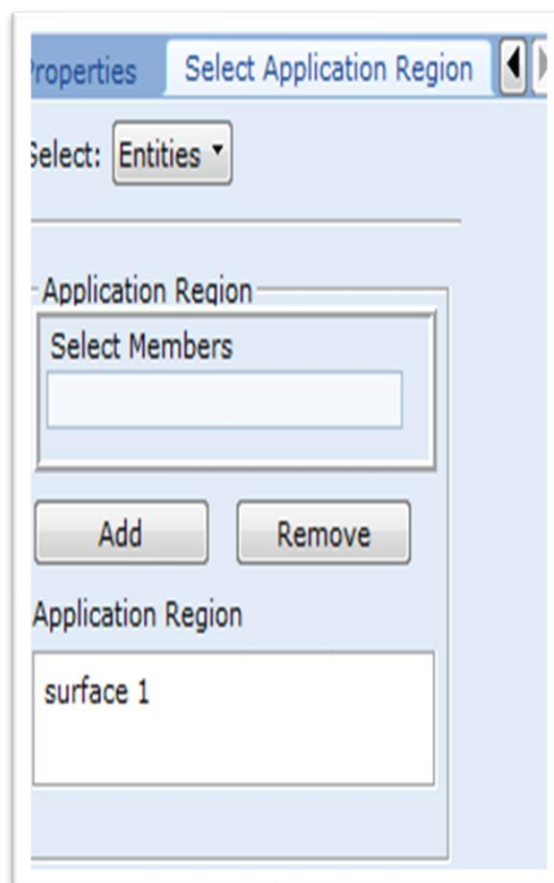


Figure II-9 Sélection de la région d'application des propriétés.

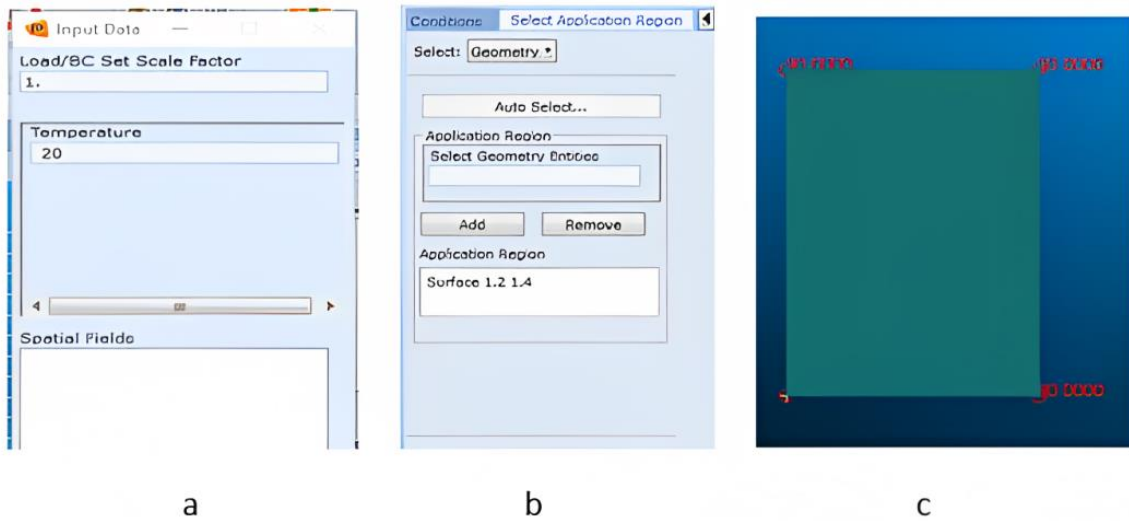


Figure II-10 Définition de la température au bord inférieur et supérieur de la plaque : (a) Définition de la température à 20°C, (b) sélection de la région d'application (c) visualisation correspondante dans Patran.

En utilisant la même manière, on définit une température de 270°C pour les côtés gauche et droit.

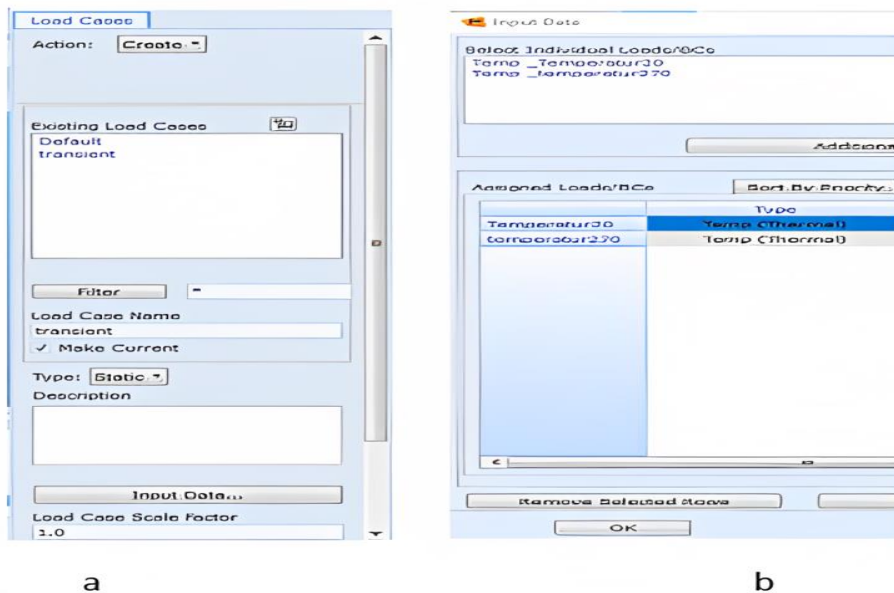


Figure II-11 Création d'un cas de charge : (a) nommé le cas « transient » (b) sélectionner leur charge

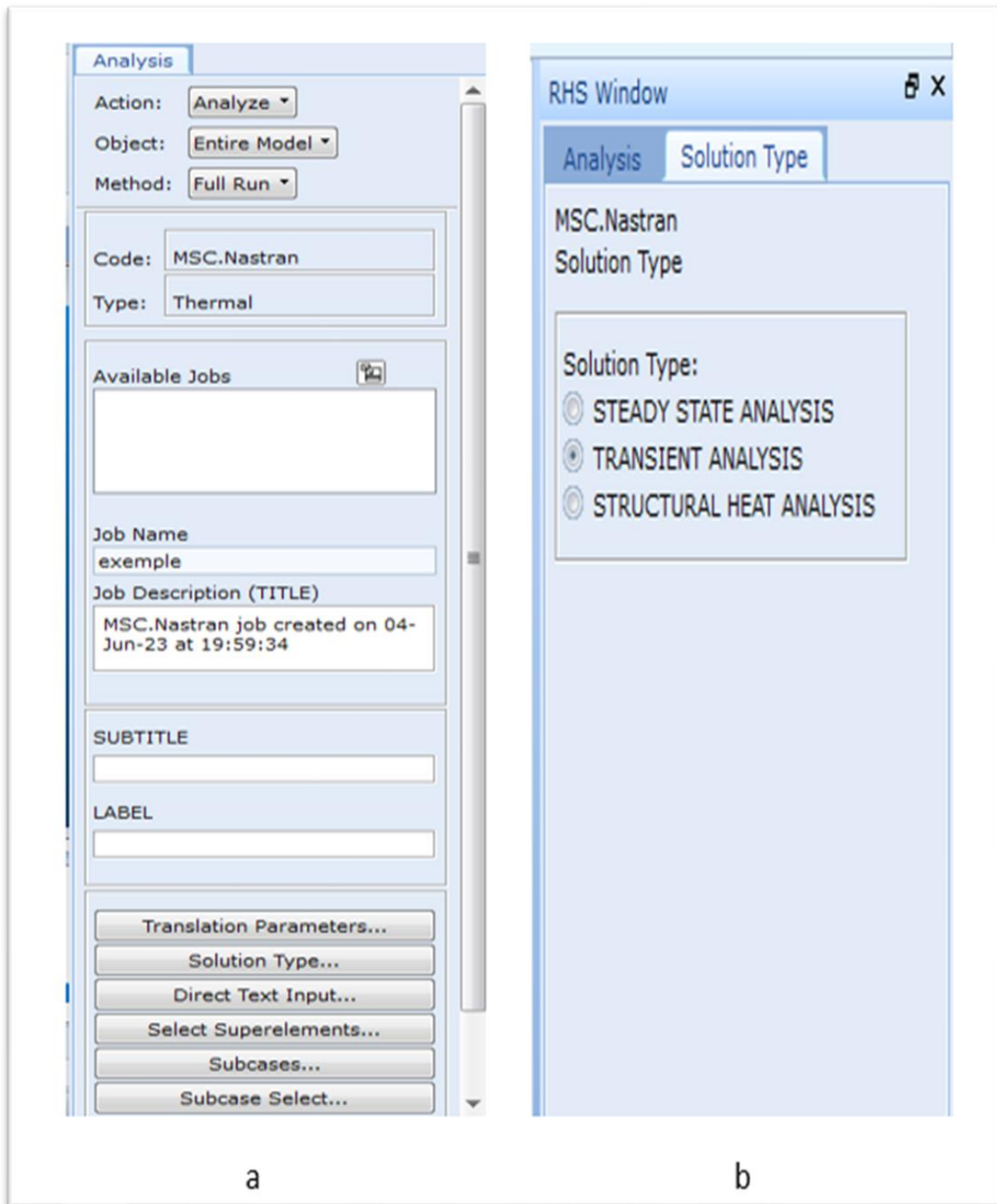
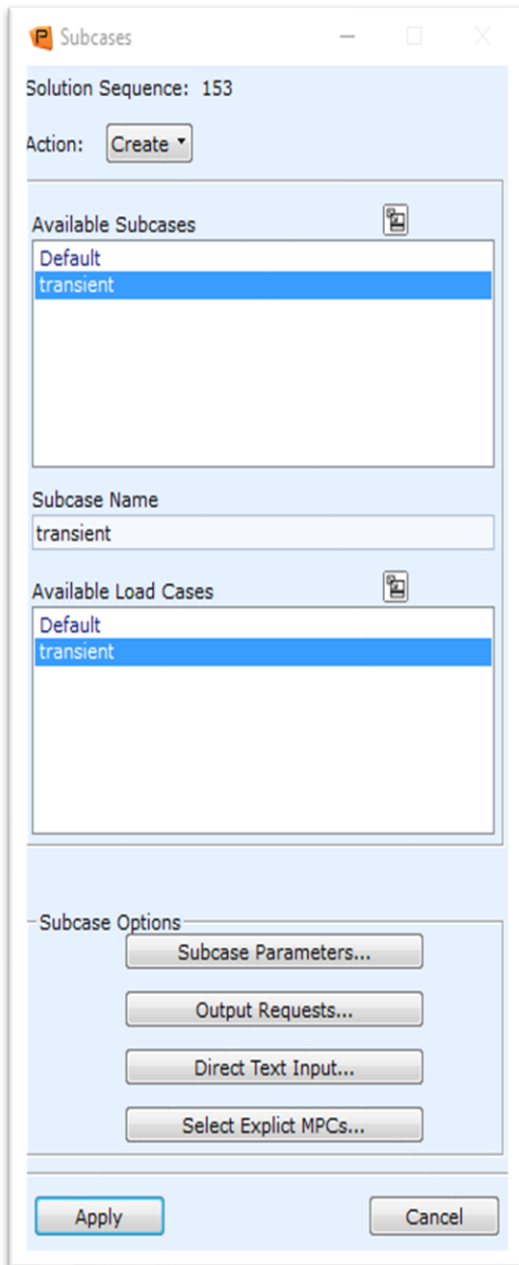
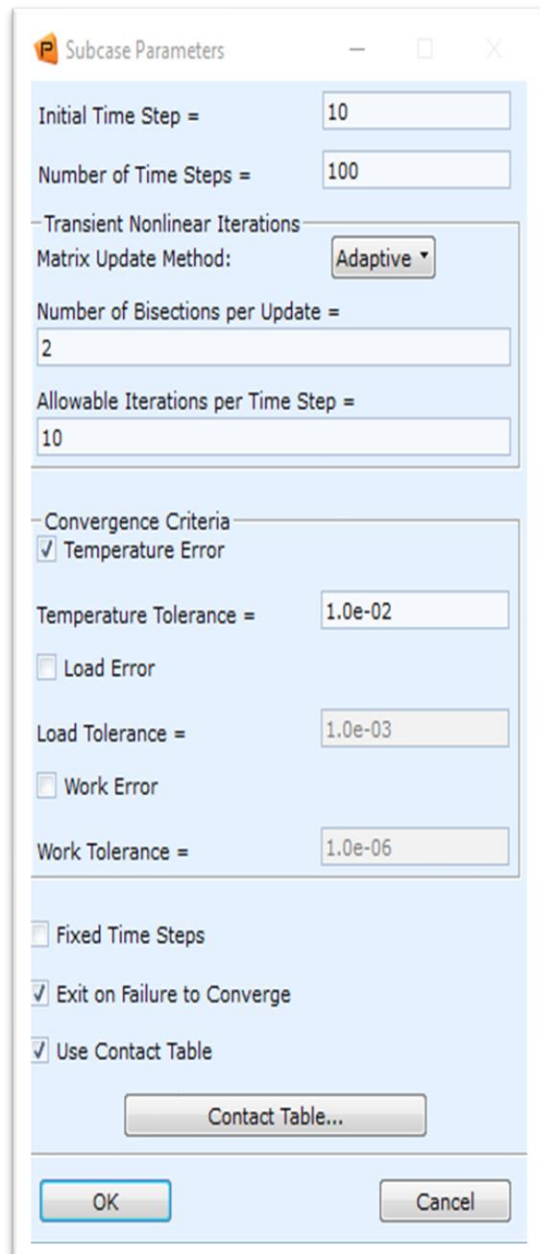


Figure II-12 analyse : (a) nommé le cas « transient » (b) sélection leur charge





a



b

Figure II-13 Définition du pas de temps et du nombre d'itération de l'analyse pour le cas transient : (a) sélection le cas transient (b) défini le pas et le nombre d'itération.

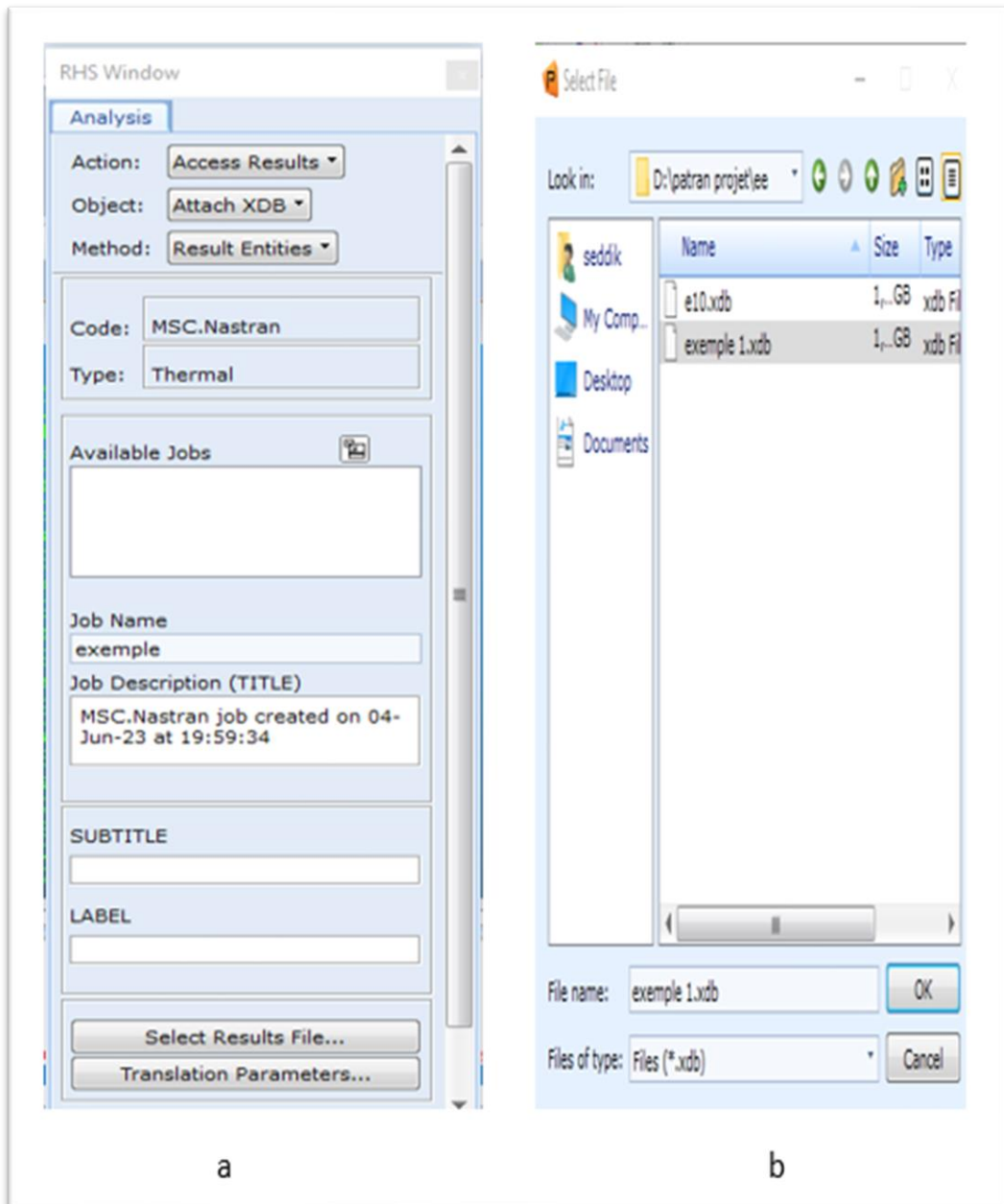


Figure II-14 Accéder aux données des résultats (.xdb) créées par MSC Nastran : (a) configuration, (b) selecte le fichier de résultats.

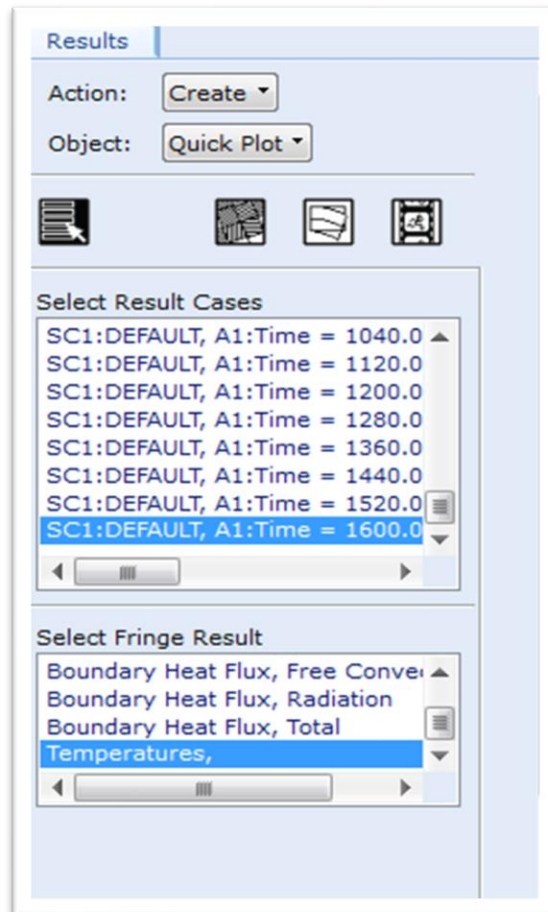


Figure II-15 Configuration pour la visualisation des résultats sous forme de contours.

#### II.4. Exemple 2 : plaque trouée

Une surface rectangulaire en aluminium ( $0.3 \times 0.2$  m) contient 8 pores circulaires de diamètre 0.04 m avec une épaisseur de 0.02 m, est soumise à des conditions de température fixes. La température dans la frontière Nord et Sud de la plaque est maintenue à  $20^{\circ}\text{C}$ , tandis que sur les frontières East et West est maintenue à  $270^{\circ}\text{C}$ .

A partir de l'exemple 1, seulement les deux premières étapes sont changées ; la création de géométrie et le maillage. En plus des étapes précédentes de l'exemple 1, nous avons également réalisé les actions suivantes : Création d'une courbe circulaire 2D ; une courbe en forme de cercle a été générée dans le modèle, division de la surface pour créer des pores ; la surface du modèle a été divisée en petites sections pour créer des pores.

Les figures II.16 à II.22 montrent la configuration dans le logiciel PATRAN pour la crée les pores et le maillage du model 2.

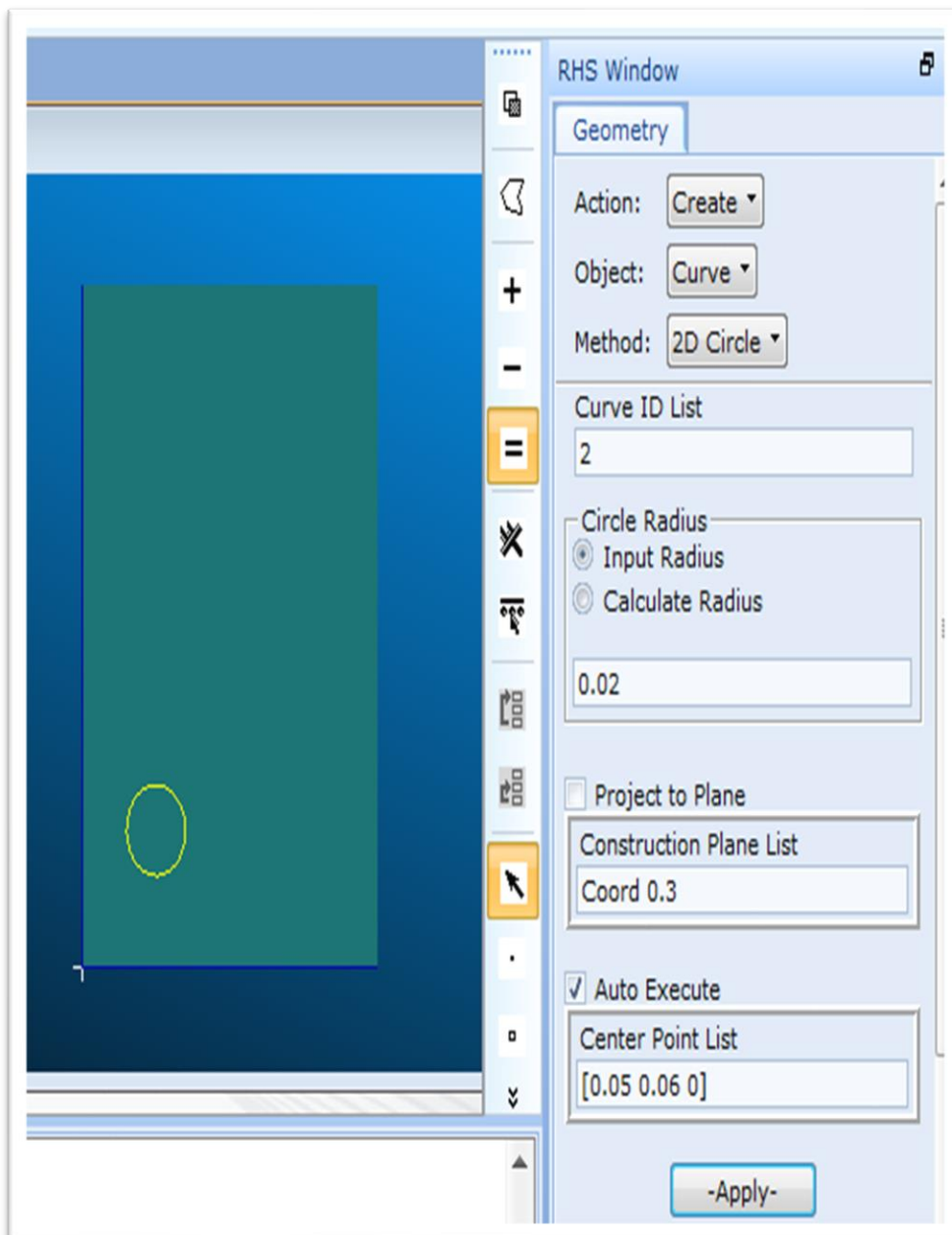


Figure II-16 Configuration de la création de courbes et de leur visualisation.

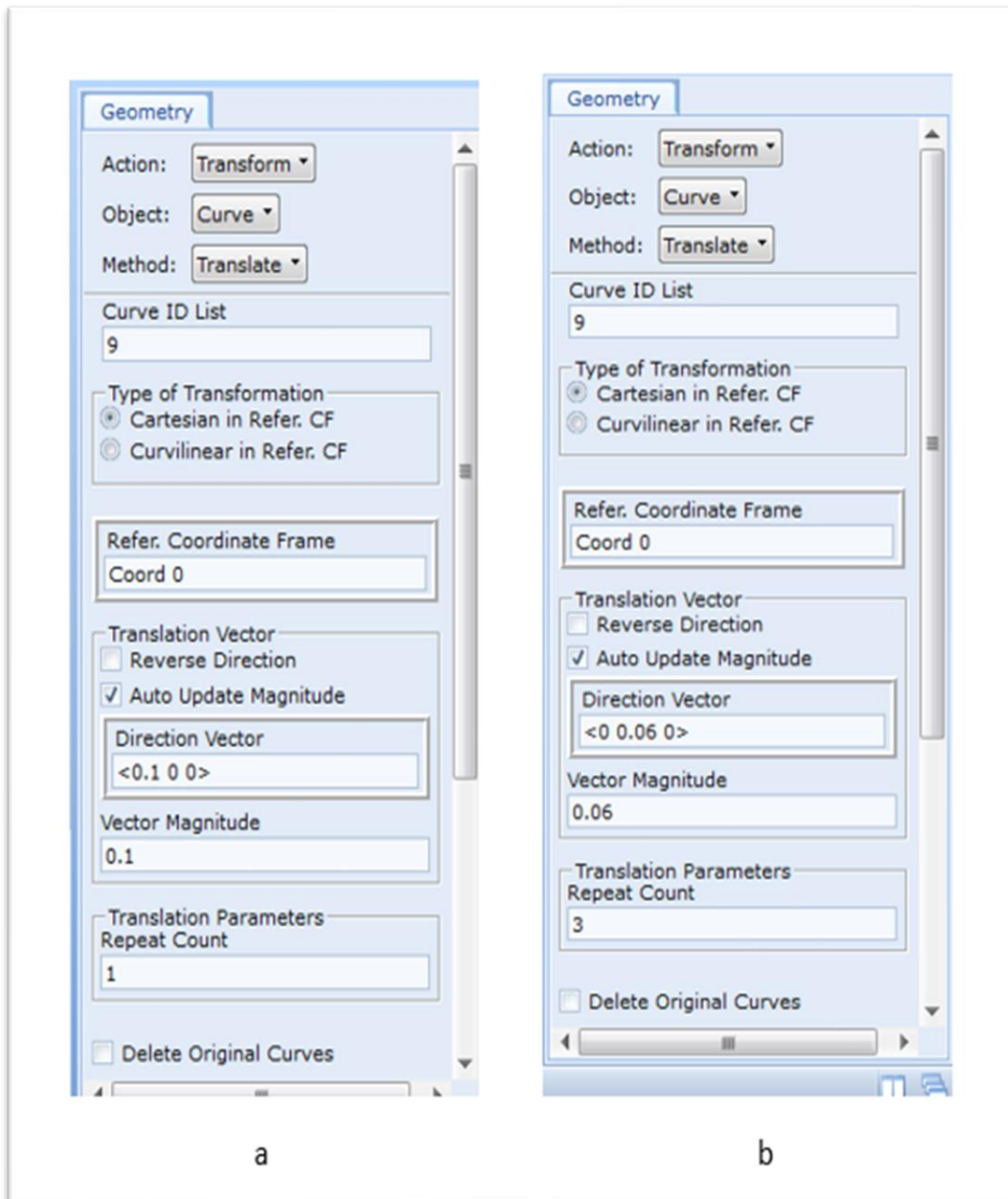


Figure II-17 Configuration de l'application avec l'option de transformation pour créer d'autres courbes : (a) Transformation de la courbe 1 le long de l'axe x, (b) Transformation des deux courbes (1, 2) le long de l'axe y.

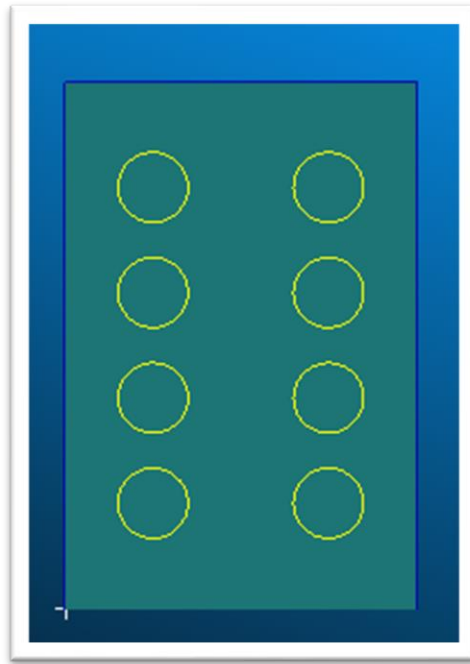


Figure II-18 Visualisation de la surface avec les Coubes.

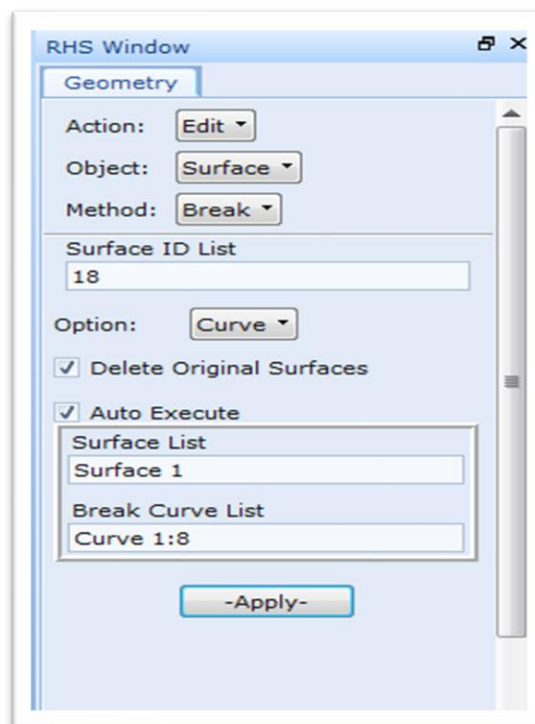


Figure II-19 Configuration pour éditer la surface en utilisant l'option de découpage.

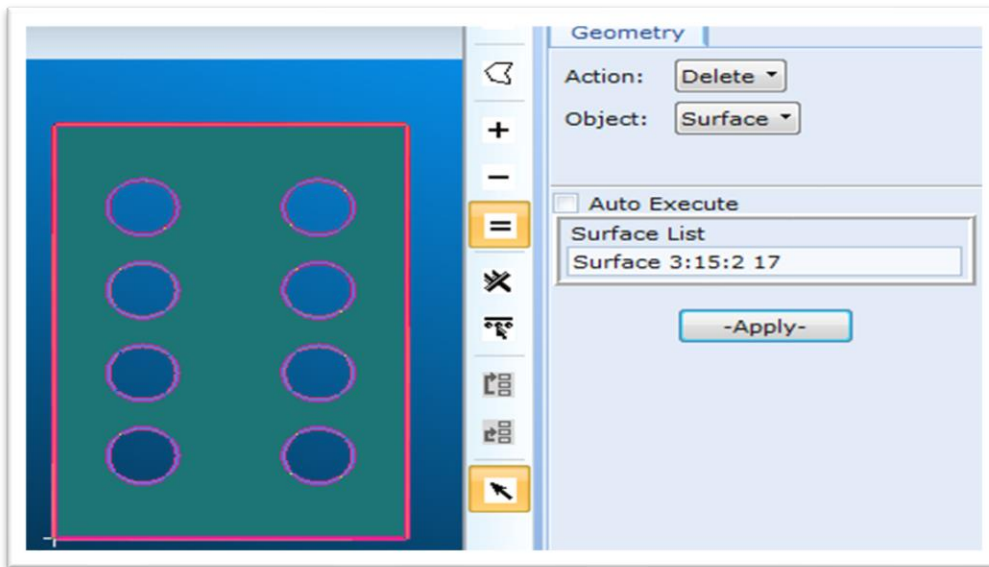


Figure II-20 Configuration pour supprimer les surfaces intérieures avec la visualisation de la géométrie finale du model 2.

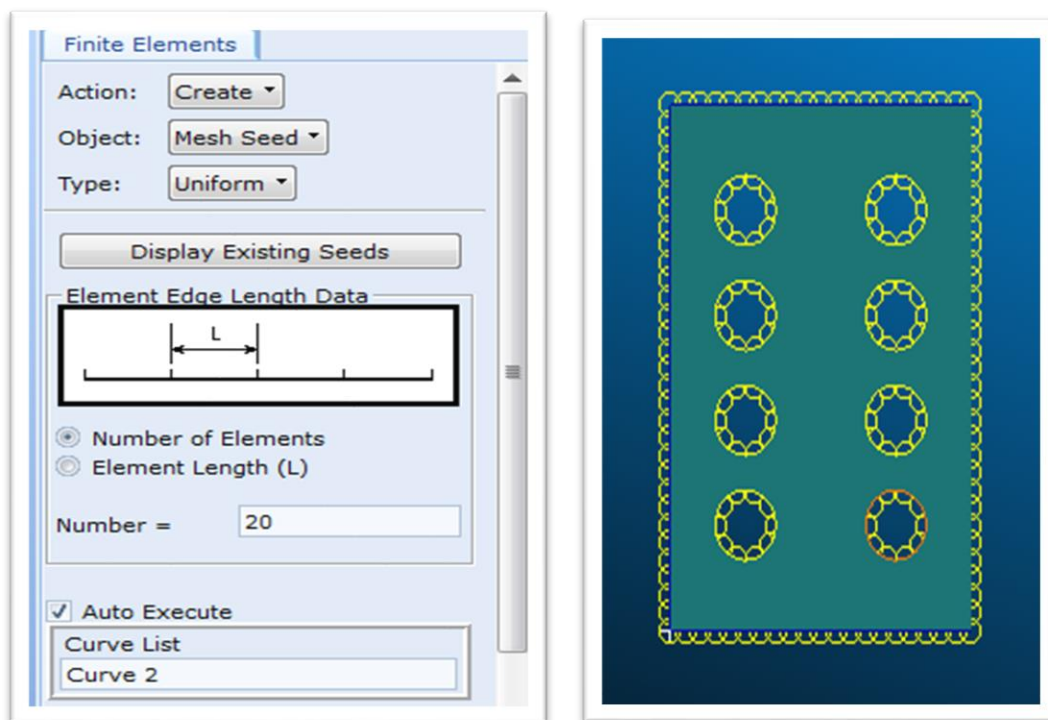


Figure II-21 Configuration de la création de la taille des éléments avec la visualisation correspondante du model 2.



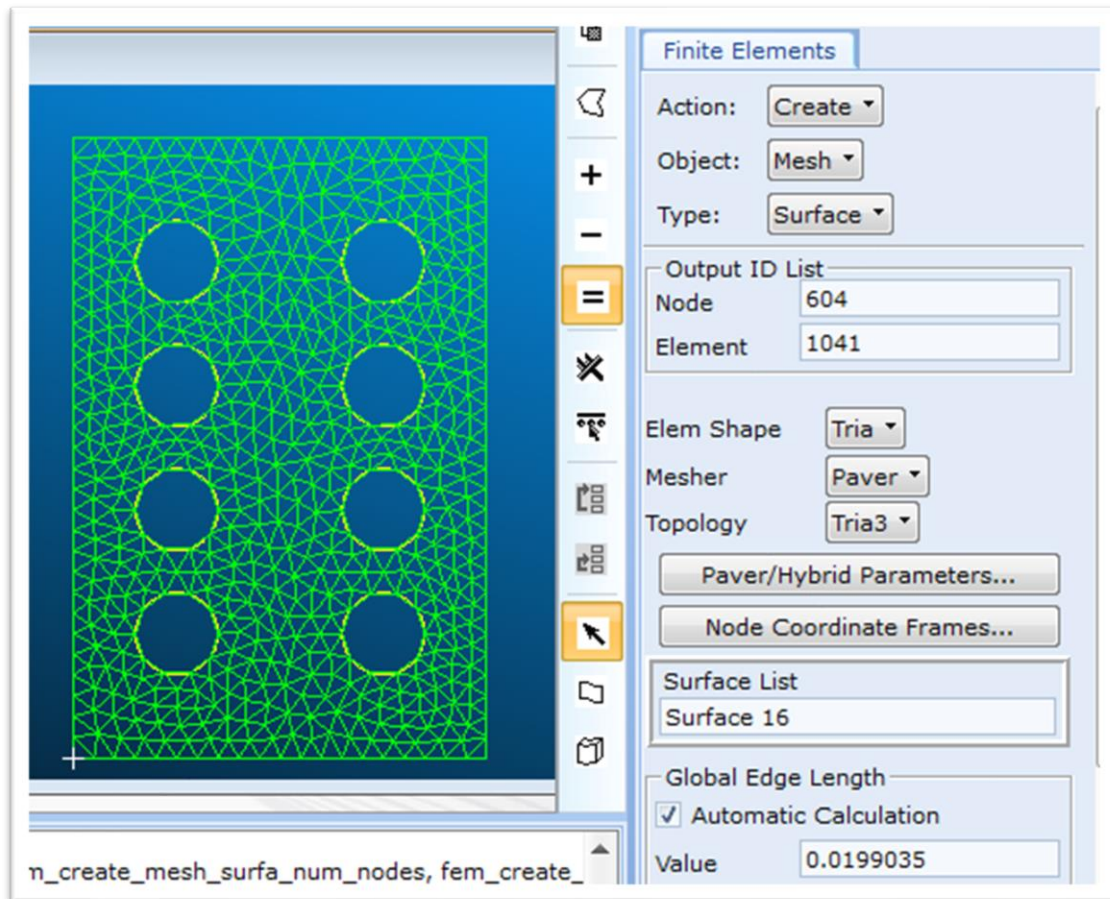


Figure II-22 Configuration de la création du maillage non structuré en éléments triangulaires du model 2 avec les paramètres correspondants.

## II.5. Conclusion

Ce chapitre, offre une explication détaillée des étapes à faire pour réaliser des simulations par PATRAN NASTRAN. Il fournit une base solide pour comprendre et utiliser efficacement les commandes de ce logiciel. Ce dernier, à la capacité de gérer des modèles complexes. En suivant les étapes présentées et en s'appuyant sur les exemples, les utilisateurs peuvent acquérir les compétences nécessaires pour obtenir des résultats précis et fiables dans leurs projets d'ingénierie.



**CHAPITRE III**  
**OUTILS ET CONFIGURATIONS EXPERIMENTALES**

## **CHAPITRE III. OUTILS ET CONFIGURATIONS EXPEREMENTALS**

### **III.1. Introduction**

La mesure de la température joue un rôle essentiel dans de nombreux processus industriels, et elle nécessite l'utilisation de diverses méthodes de mesure. Parmi ces méthodes, la plus couramment utilisée est la mesure de température basée sur des capteurs électriques. Cette approche requiert l'utilisation d'outils matériels et logiciels spécifiques.

Dans notre étude expérimentale, nous nous concentrons sur l'utilisation de capteurs de température électriques : DS18B20, LM35 et les thermocouples de type K. Pour collecter et analyser les données de température captées, nous utilisons deux différents circuits, la première basée sur carte Arduino programmable, la deuxième basée sur le microcontrôleur PIC16F8777A. Plus ces outils le logiciel LabVIEW pour le traitement des données.

Ce chapitre présente en détail les outils matériels et logiciels que nous avons utilisés dans notre étude expérimentale. Nous décrivons les capteurs DS18B20, LM35, la carte Arduino programmée avec l'IDE Arduino, le microcontrôleur PIC16F8777A programmé avec logiciel MIKROC, le logiciel de simulation Proteus. De plus, nous expliquons comment LabVIEW a été utilisé pour la visualisation et l'analyse des données de température.

Grâce à la combinaison de ces outils et méthodes, nous avons pu réaliser des mesures de température précises et obtenir des résultats fiables pour notre étude expérimentale.

### **III.2. Le materiel utilisé**

#### **III.2.1. Thermocouple type k**

Un thermocouple est un capteur utilisé pour mesurer la température. Il est constitué de deux métaux différents reliés à une extrémité. Lorsque la jonction de ces métaux est chauffée ou refroidie, une tension variable est générée, qui peut ensuite être convertie en une valeur de température. Parmi les types de thermocouples, le type K est le plus populaire en raison de sa large plage de températures et de son coût abordable. Il est composé d'un conducteur positif en nickel-chrome et d'un conducteur négatif en nickel-aluminium. Ce type de thermocouple peut mesurer des températures allant de -200 à 1260 degrés Celsius. La précision standard

d'un thermocouple de type K est généralement d'environ  $\pm 1,5$  à  $\pm 2,5$  degrés Celsius ou  $\pm 0,4$  % à  $\pm 0,75$  % de la température mesurée.



Figure III-1 Thermocouple type k.

### III.2.2. Le MAX6675

Le MAX6675 est un autre type de capteur utilisé pour mesurer la température, en particulier avec les thermocouples de type K. Il s'agit d'un circuit intégré spécialement conçu pour convertir les variations de tension produites par un thermocouple en une mesure de température numérique. Une fois le thermocouple connecté au MAX6675, le circuit intégré convertit les variations de tension générées par le thermocouple en une valeur numérique correspondante à la température mesurée. Cette valeur numérique peut ensuite être lue et utilisée par un microcontrôleur ou un système de traitement des données. Le MAX6675 offre une précision élevée et une résolution de mesure élevée, ce qui en fait un choix populaire. Poudre nombreuses applications nécessitant des mesures de température précises, telles que les systèmes de contrôle de température industriels ou les expériences scientifiques.

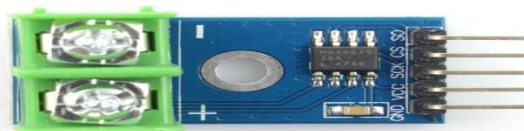


Figure III-2 Le MAXX6675.

### III.2.3. Le DS18B20

Le DS18B20 est un capteur de température numérique précis et polyvalent. Utilisant une interface de communication One Wire, il peut être facilement connecté à d'autres composants à l'aide d'un seul fil de données. Ce capteur offre une haute précision de mesure de température, avec une résolution allant jusqu'à 12 bits et une précision pouvant atteindre  $\pm 0,5$  °C. Il dispose d'une plage de température étendue, allant de -55 °C à +125 °C, le rendant adapté à une variété d'applications. De plus, le DS18B20 peut être alimenté par le bus de données, ce qui élimine le besoin d'une alimentation externe. Chaque capteur DS18B20 possède également une mémoire programmable, permettant de stocker des informations spécifiques à chaque capteur. Avec des bibliothèques Arduino disponibles, l'intégration du DS18B20 avec les cartes Arduino est simple et pratique. En somme, le DS18B20 est un choix courant pour les projets nécessitant une mesure précise de la température, grâce à sa précision, sa facilité d'utilisation et sa compatibilité avec les plateformes Arduino.

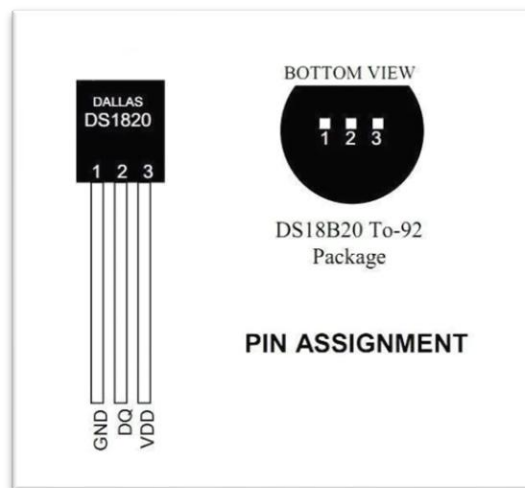


Figure III-3 Capteur de température DS18B20.

### III.2.4. Le capteur LM35

Le capteur de température LM35 est un capteur analogique largement utilisé dans de nombreuses applications en raison de ses caractéristiques remarquables. Il génère une tension analogique qui est directement proportionnelle à la température mesurée, avec un facteur d'échelle linéaire de 10 millivolts par degré Celsius (mV/°C). Cette linéarité facilite la conversion de la tension de sortie en une valeur de température précise. Avec sa précision garantie de 0,5 °C à une température de référence de 25 °C, le LM35 permet des mesures fiables et précises. Il est capable de fonctionner dans une large plage de température, allant de



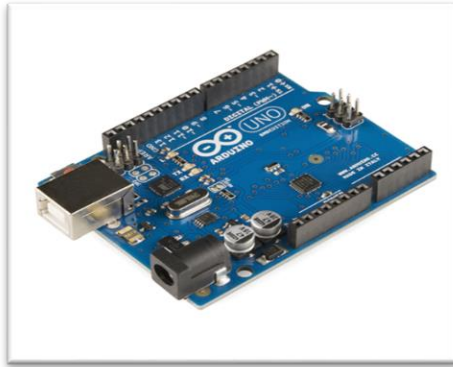


Figure III-5 Arduino UNO.

### III.2.6. Le microcontrôleur pic16f877A

Le PIC16F877A est un microcontrôleur couramment utilisé, disponible en deux versions de boîtiers : 40 broches et 44 broches. Il offre une gamme étendue de fonctionnalités et de capacités pour répondre aux besoins des projets électroniques. Ce microcontrôleur dispose de cinq ports d'E/S (Entrée/Sortie) : Ports A, B, C, D et E, qui permettent de connecter et de contrôler divers périphériques et composants externes. Avec ses 15 interruptions, le PIC16F877A peut gérer efficacement les événements et les signaux d'entrée nécessitant une réponse immédiate. Ce microcontrôleur offre également huit canaux d'entrée analogique/numérique (A/N), permettant de mesurer et de convertir des signaux analogiques en valeurs numériques. Le PIC16F877A est équipé d'un port esclave parallèle, qui facilite la communication avec d'autres dispositifs externes prenant en charge des interfaces parallèles.

Avec une fréquence de fonctionnement de 20 MHz, ce microcontrôleur offre une puissance de traitement adéquate pour de nombreuses applications électroniques.

En termes de communications série, le PIC16F877A prend en charge les protocoles MSSP (Master Synchronous Serial Port) et USART (Universal Synchronous/Synchronous Receiver-Transmitter). Ces protocoles permettent d'établir des connexions série avec d'autres périphériques, tels que des capteurs, des afficheurs ou d'autres microcontrôleurs, pour échanger des données. Le microcontrôleur intègre un module analogique-numérique 10 bits avec huit canaux d'entrée, offrant une conversion précise des signaux analogiques en valeurs numériques.

Avec une mémoire de programme Flash de 8 000 mots, le PIC16F877A peut stocker le code exécutable et les instructions du programme. La mémoire de données de 368 octets offre

un espace pour stocker des variables, des données temporaires et des structures de données nécessaires à l'exécution du Programme. Elle permet de manipuler et de gérer les données de manière efficace. De plus, le microcontrôleur dispose d'une mémoire EEPROM de données de 256 octets, qui permet de stocker des données non volatiles. Cette mémoire est utile pour stocker des paramètres de configuration, des valeurs calibrées ou d'autres données importantes qui doivent être conservées même en cas de coupure d'alimentation.



Figure III-6 Le PIC16F877A.

### III.2.7. Le FTDI FT232

Le FTDI FT232 est un circuit intégré USB-série polyvalent et largement utilisé dans de nombreux projets électroniques. Il agit en tant que convertisseur USB-série, facilitant la communication entre un périphérique USB, tel qu'un ordinateur, et un composant électronique, tel qu'un microcontrôleur. Grâce à son interface USB 2.0, le FT232 offre une connexion rapide et fiable avec des débits de transfert allant jusqu'à 12 Mbps. Il utilise des pilotes USB virtuels qui émulent un port série sur l'ordinateur, permettant une compatibilité étendue avec différentes plateformes. La configuration du FT232 est flexible, avec des broches configurables pour s'adapter aux besoins spécifiques du projet. De plus, le FT232 intègre un régulateur de tension, ce qui simplifie l'alimentation du circuit cible directement à partir de l'USB. En résumé, le FTDI FT232 est un circuit intégré essentiel pour établir une

communication fiable et rapide entre des périphériques USB et des composants électroniques, offrant une grande flexibilité de configuration et une alimentation intégrée pratique.



Figure III-7 Le FTDI FT232.

### III.2.8. Plaque chauffante

La plaque chauffante est composée d'un revêtement en aluminium et d'un élément chauffant en céramique PTC. Le PTC est un type de résistance à coefficient de température positif utilisé pour les applications de chauffage. La plaque chauffante conçue pour atteindre une température maximale de 240 degrés Celsius. Alimentée par une tension de 12 volts en courant continu, son élément chauffant en céramique maintient une température de fonctionnement stable.

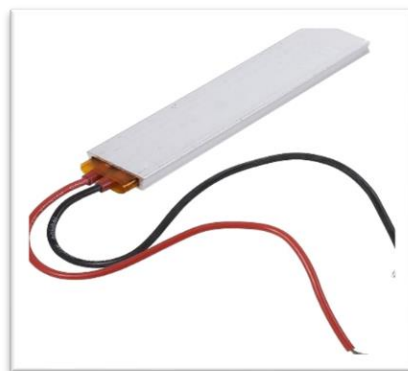


Figure III-8 Plaque chauffante.



### III.2.9. Adhésif isolé



Figure III-9 Adhésif isolant.

### III.2.10. Les échantillons étudiés

Dans le cadre de notre étude expérimentale, nous avons réalisé la préparation d'une plaque poreuse en utilisant des outils spécifiques tels que des forêts, machine de découpage. Ces outils ont été choisis en fonction de nos besoins pour créer des trous de différents diamètres dans le matériau de la plaque. Les forêts se sont révélées particulièrement utiles pour percer des trous précis de divers diamètres dans notre matériau. Ils sont conçus pour pénétrer le matériau en exerçant une pression contrôlée, ce qui nous a permis de créer des trous correspondants à nos besoins expérimentaux.

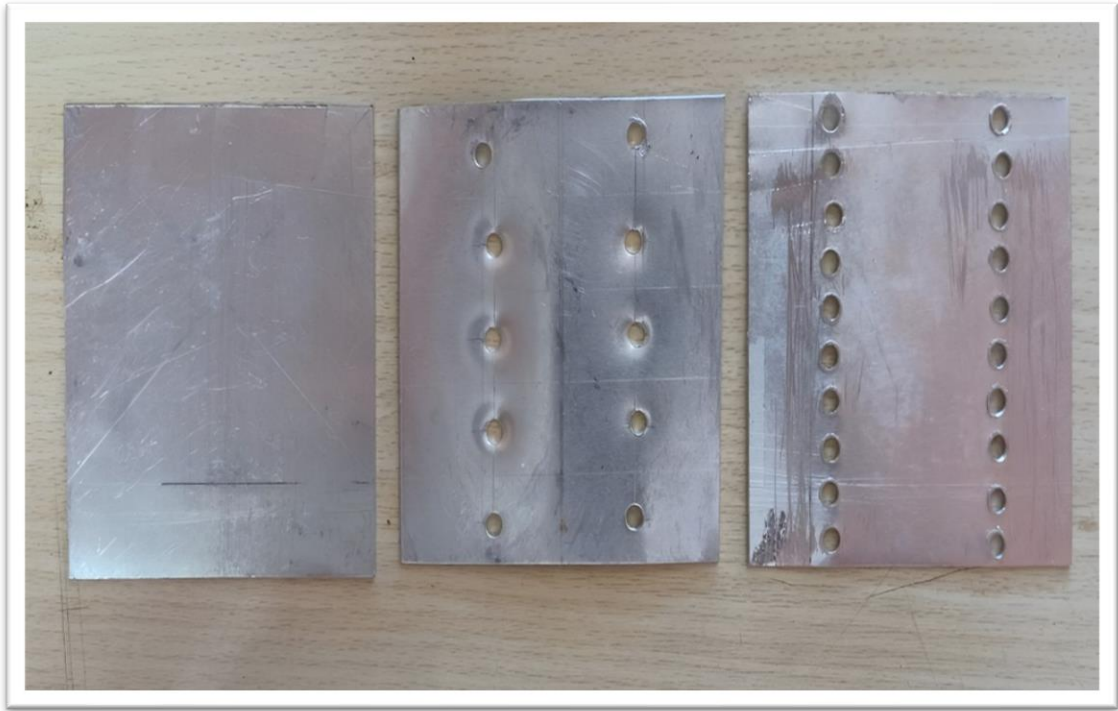


Figure III-10 Echantillons en aluminium qui montrent le changement de nombre des trous.

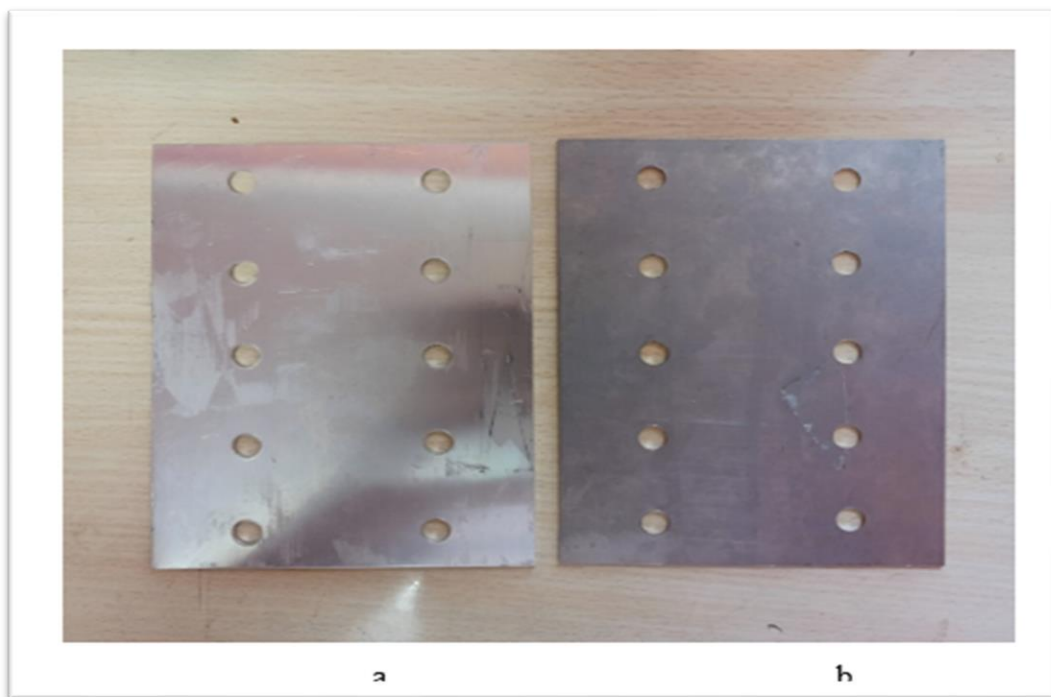


Figure III-11 Echantillons de 10 trous au même diamètre pour différents matériaux(a) plaque en aluminium (b) plaque en titane.

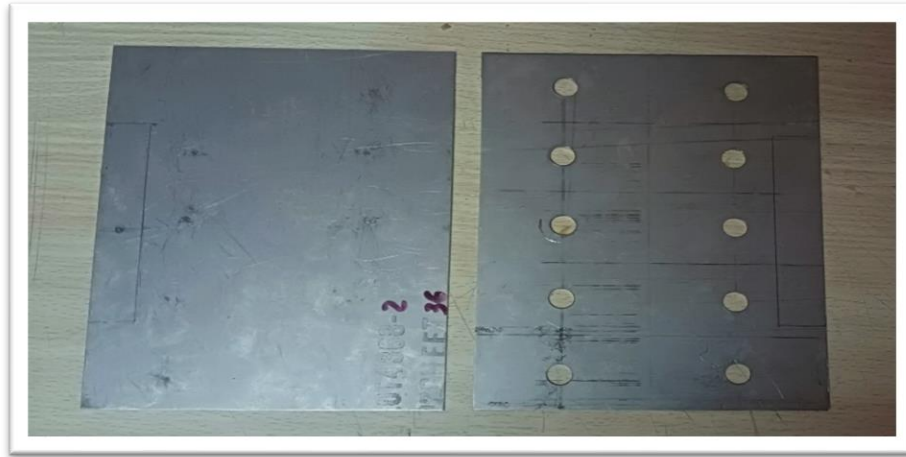


Figure III-12 Echantillons en titane pour une plaque simple et une plaque trouée (10 trous).

### III.3. Les logiciels utilisé

#### III.3.1. Arduino IDE

L'environnement de développement intégré (IDE) Arduino est un logiciel convivial conçu spécifiquement pour programmer et développer des projets pour les cartes Arduino. Son interface utilisateur intuitive offre un accès facile à toutes les fonctionnalités nécessaires. L'éditeur de code intégré facilite la rédaction et la modification de votre programme Arduino, avec des fonctionnalités pratiques telles que la coloration syntaxique et l'autocomplétions du code. L'IDE Arduino comprend également un système de compilation intégré, qui vérifie la validité de votre code et le traduit en langage machine compréhensible par la carte Arduino. Une fois le code compilé avec succès, vous pouvez le téléverser sur la carte Arduino via une connexion USB. L'IDE Arduino offre également un gestionnaire de bibliothèques pratique, qui permet d'installer facilement des bibliothèques supplémentaires pour accéder à des fonctionnalités étendues. En outre, il dispose d'une console de sortie qui affiche les messages de débogage et les résultats des opérations. Grâce à la communauté en ligne d'Arduino, vous pouvez accéder à des forums, des tutoriels, des exemples de code et des ressources pédagogiques pour obtenir de l'aide et améliorer vos compétences en programmation Arduino. En somme, l'IDE Arduino est un outil complet et convivial qui simplifie le processus de développement de projets Arduino en offrant une interface conviviale, un éditeur de code puissant, un système de compilation, un gestionnaire de bibliothèques et une console de sortie (Figure III.3).

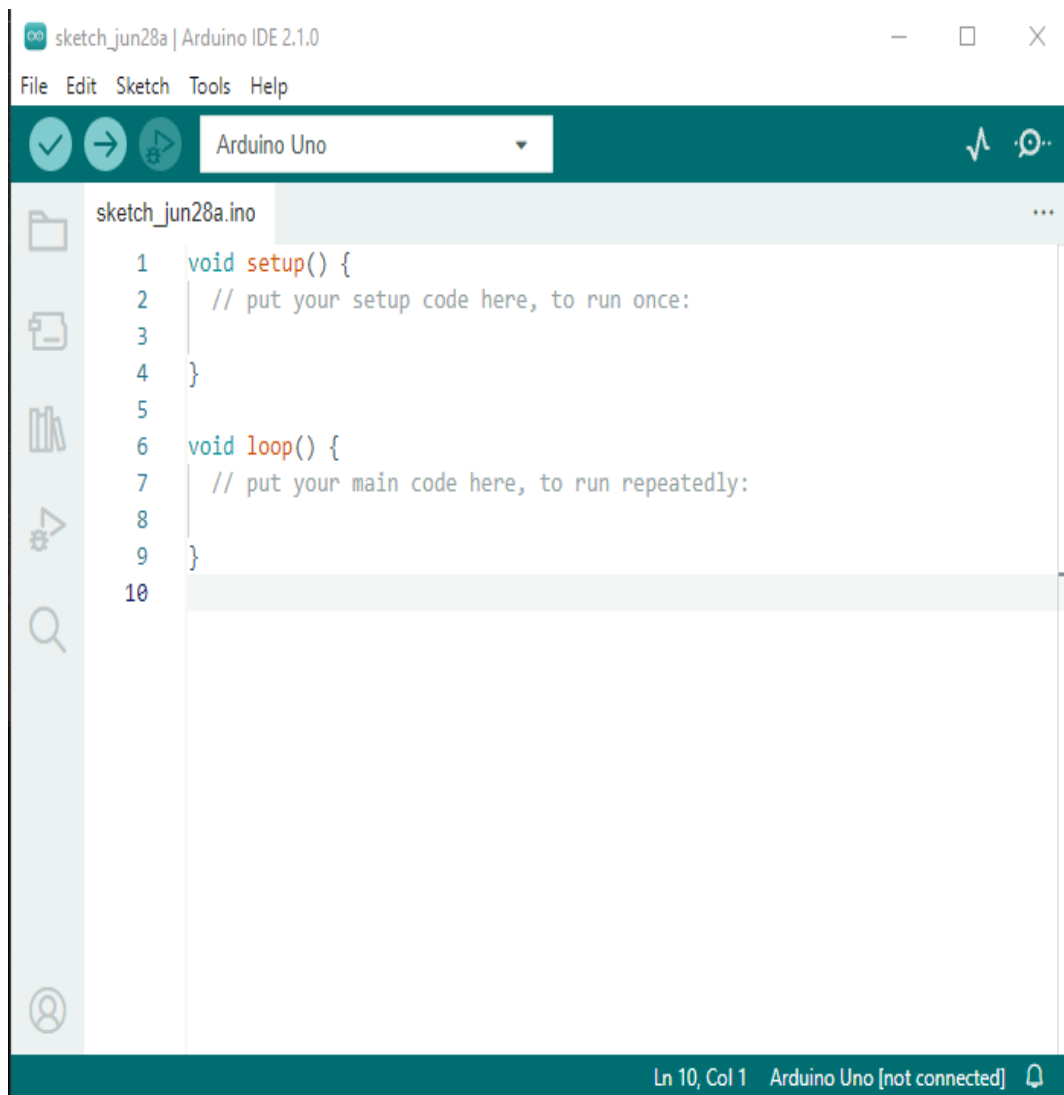


Figure III-13 Arduino IDE principale interface.

### III.3.2. MikroC

MikroC est un environnement de développement intégré (IDE) pour la programmation des microcontrôleurs PIC en langage C. Il a été choisi en raison de ses avantages et de ses fonctionnalités spécifiques (Figure III.14).

Parmi les avantages de MikroC, on peut citer sa facilité d'utilisation, sa compatibilité avec une large gamme de microcontrôleurs PIC et sa bibliothèque de fonctions intégrées. Ces fonctions simplifient le développement du code et permettent de gagner du temps lors de la programmation.

Dans le développement du programme pour notre dispositif expérimental, nous avons utilisé plusieurs bibliothèques spécifiques fournies par MikroC, telles que la bibliothèque ADC pour la conversion analogique-numérique.

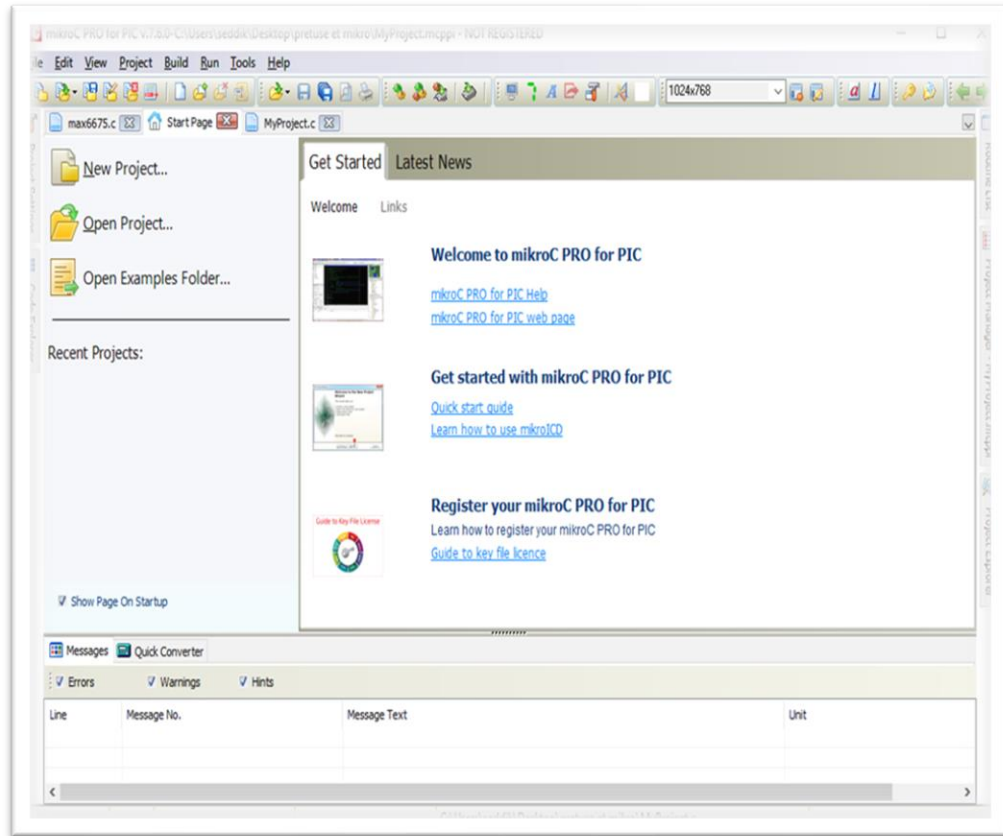


Figure III-14 la façade Principale de MIKROC.

### III.3.3. Proteus

Proteus est un logiciel de simulation de circuits électroniques et de microcontrôleurs développé par Labcenter Electronics. Proteus permet de simuler et tester le circuit électronique avant sa mise en œuvre réelle, il utilise Le fichier hexadécimal qui généré par le MikroC. La simulation permet également de vérifier les connexions du circuit et d'identifier et de résoudre les problèmes potentiels.

Parmi les fonctionnalités spécifiques de Proteus utilisées dans cette étude, on peut citer la simulation de circuits analogiques et numériques, la simulation du microcontrôleur PIC (Figure III.16), et l'interaction entre les différents composants du circuit, tels que le capteur LM35 et le microcontrôleur PIC. Aussi la simulation de circuit Arduino (Figure III.17), DS18B2 et les thermocouples type K. Le circuit a été simulé dans Proteus en utilisant des

composants virtuels correspondant aux composants réels. Les paramètres de simulation ont été ajustés pour refléter les conditions réelles de l'expérience, et les résultats de la simulation ont été utilisés pour valider le fonctionnement du circuit attendu.

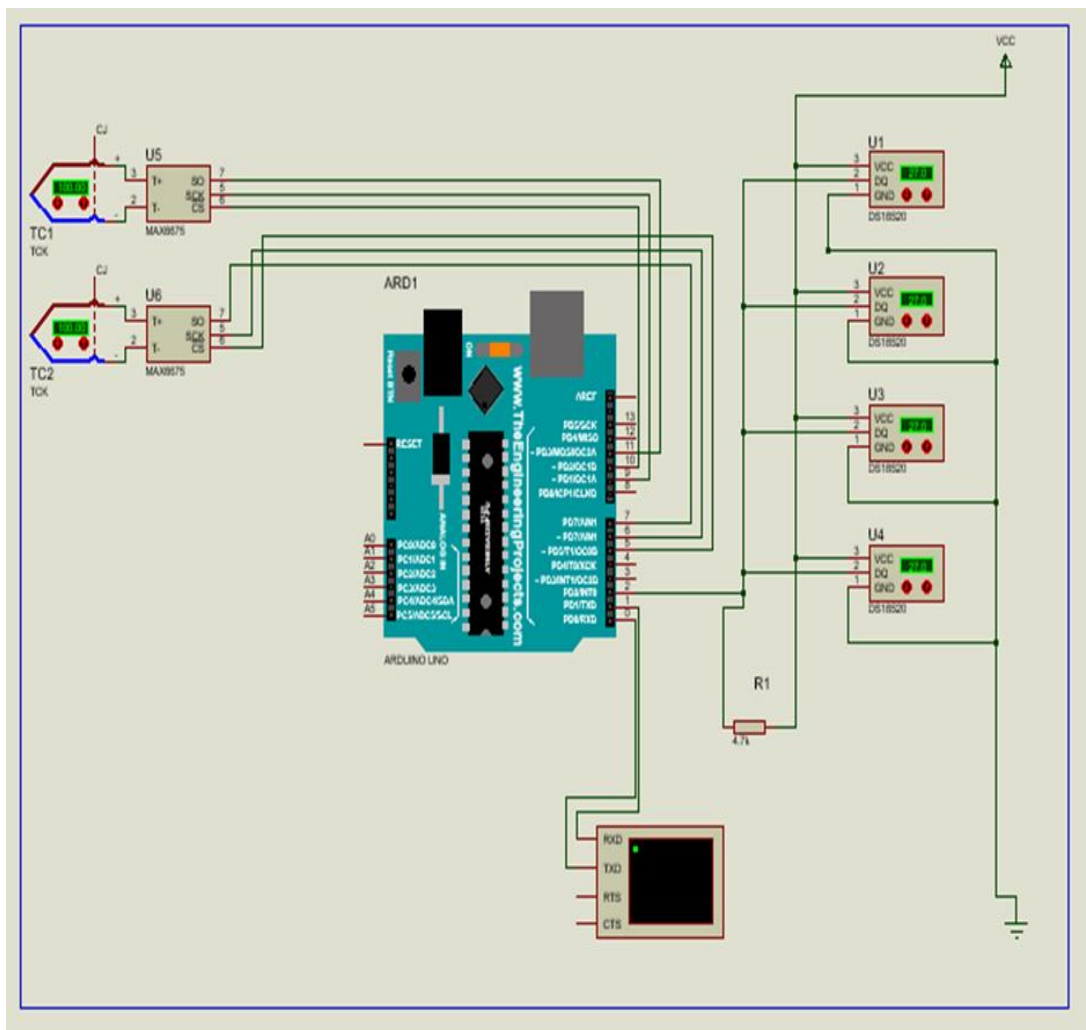


Figure III-15 Simulation de circuit basé sur Arduino UNO.



### **III.3.4.1. Environnement du Logiciel LabVIEW**

LabVIEW est un logiciel d'environnement de développement qui utilise une interface graphique intuitive basée sur le concept de programmation par blocs. Les utilisateurs peuvent créer des applications en reliant des icônes graphiques représentant des variables, des fonctions et des opérations, plutôt que d'écrire du code texte traditionnel. Cette approche visuelle simplifie la création et la compréhension des programmes, même pour les utilisateurs novices en programmation.

LabVIEW propose une vaste bibliothèque de fonctions et de modules préconstruits, couvrant une multitude de domaines tels que l'acquisition de données, le traitement du signal, la communication, le contrôle et bien d'autres. Ces modules prédéfinis offrent aux utilisateurs des outils puissants et des fonctionnalités avancées, leur permettant de développer rapidement des applications sans avoir à créer chaque fonctionnalité à partir de zéro. Cela permet de gagner du temps et de simplifier le processus de développement.

En LabVIEW, il est recommandé de créer des sous-VIs (subVIs) pour encapsuler des fonctionnalités spécifiques et les réutiliser dans d'autres VIs, ce qui améliore la modularité du code et facilite sa réutilisation.

L'utilisation de sous-VIs permet de simplifier la complexité du programme global en le divisant en parties plus petites et autonomes. Par exemple, vous pouvez encapsuler la fonction d'acquisition de données dans un sous-VI, puis l'appeler depuis un VI d'interface utilisateur final. Chaque sous-VI se concentre sur une tâche spécifique et peut être testé et débogué individuellement.

Cette approche modulaire facilite également la collaboration en permettant à différentes personnes de travailler sur des sous-VIs distincts et de les intégrer par la suite dans le programme principal. Lorsque vous travaillez avec LabVIEW, vous utiliserez deux interfaces principales : le Front Panel et le Block Diagramme.

### **III.3.4.2. Le Front Panel**

Dans le Front Panel, vous pouvez concevoir la présentation graphique de votre application en ajoutant divers éléments tels que des boutons, des graphiques, des indicateurs numériques, des contrôles, des tableaux, des champs de texte, ainsi que des éléments de



décoration. Ces éléments offrent à l'utilisateur la possibilité d'interagir avec l'application en saisissant des données, en effectuant des actions et en visualisant les résultats.

Lors de la conception de l'interface utilisateur sur le Front Panel, vous avez la flexibilité de personnaliser les propriétés de chaque élément. Vous pouvez ajuster la taille, la position, la couleur et les styles pour répondre aux besoins spécifiques de votre application. Par exemple, vous pouvez définir des limites de valeur pour les contrôles numériques, configurer des mises à jour automatiques des graphiques en temps réel ou appliquer des formats de texte spécifiques pour améliorer la lisibilité.

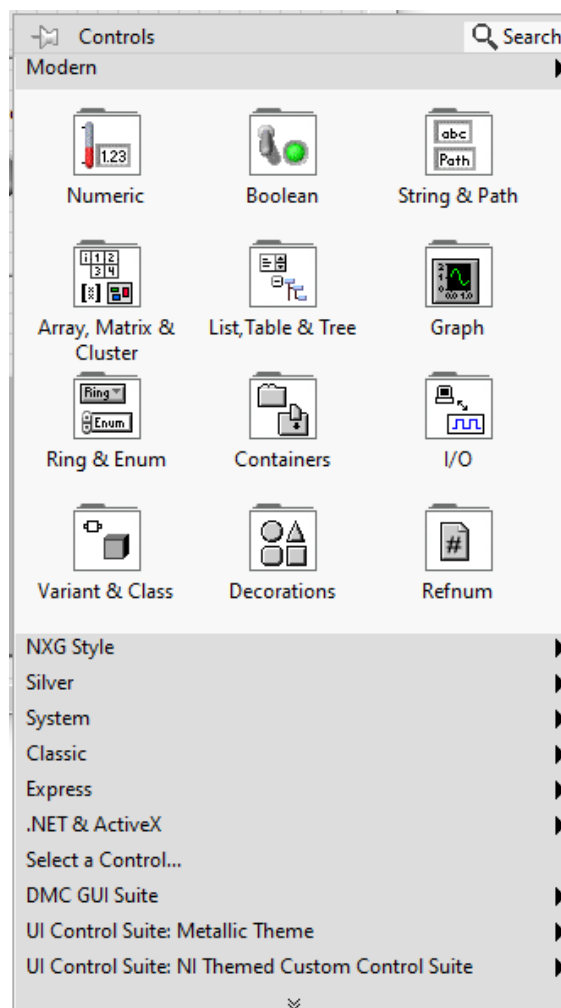


Figure III-17 Palette de contrôles.

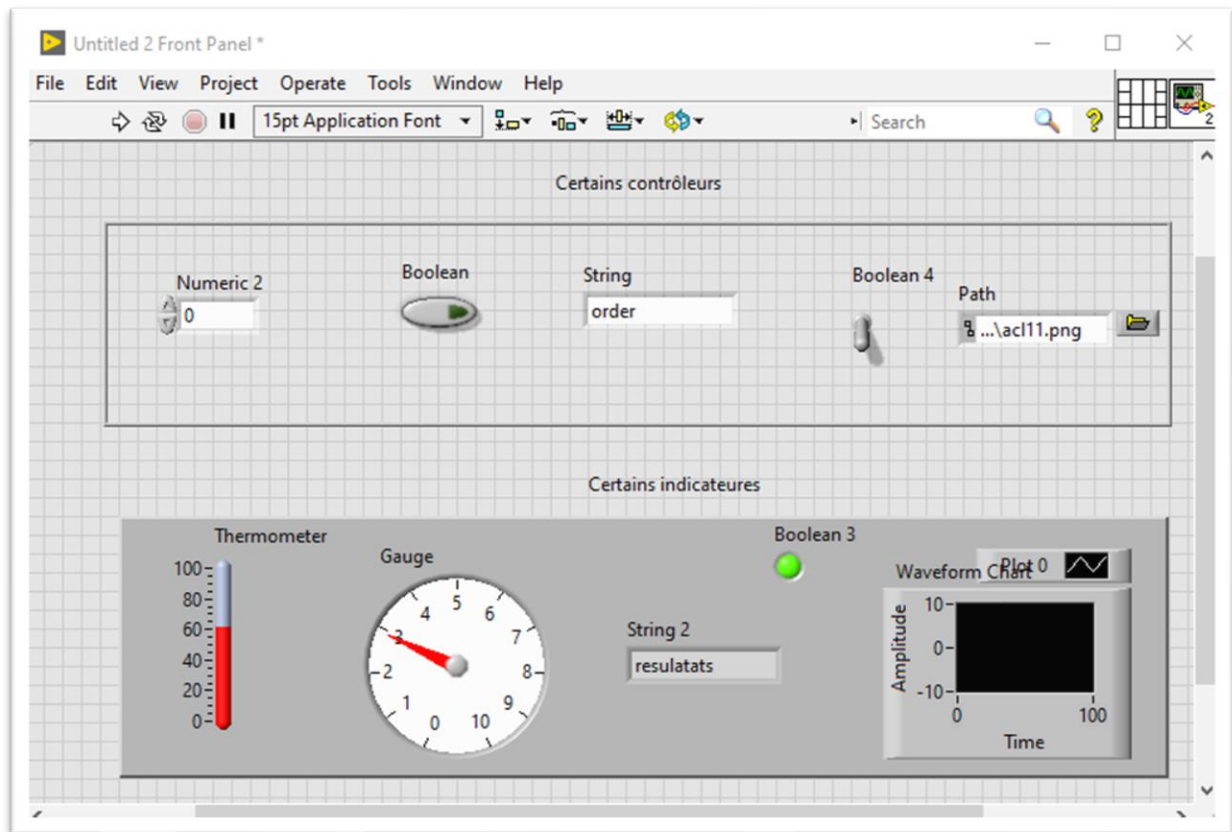


Figure III-18 Front panel de LabVIEW.

### III.3.4.3. Le Block Diagramme

Le Block Diagramme est l'endroit où vous créez la logique de votre application à l'aide de blocs de code graphiques. Tous les éléments que vous avez créés dans le Front Panel apparaissent sous forme d'icônes dans le Block Diagramme. Ces icônes représentent les contrôles (figure III.22), les indicateurs et les autres éléments de votre interface utilisateur. Dans la Palette des fonctions, vous trouverez une variété d'outils et de structures prédéfinis qui peuvent être utilisés pour construire votre logiciel. Vous pouvez utiliser ces outils pour réaliser des opérations telles que les comparaisons, les opérations mathématiques et les structures de contrôle. En utilisant ces outils et en établissant les connexions appropriées entre les icônes, vous pouvez développer la logique de votre application de manière visuelle et intuitive sur le Block Diagramme. (Figure III.19)

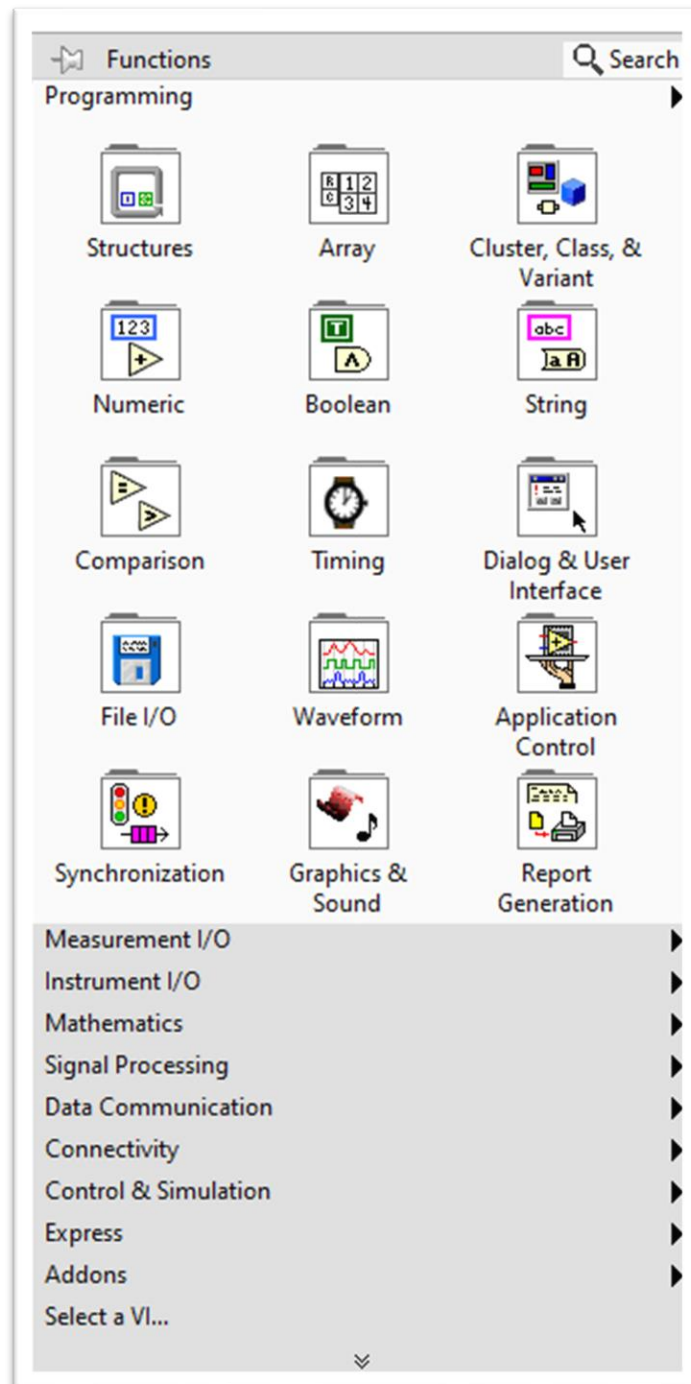


Figure III-19 Palette des fonctions.

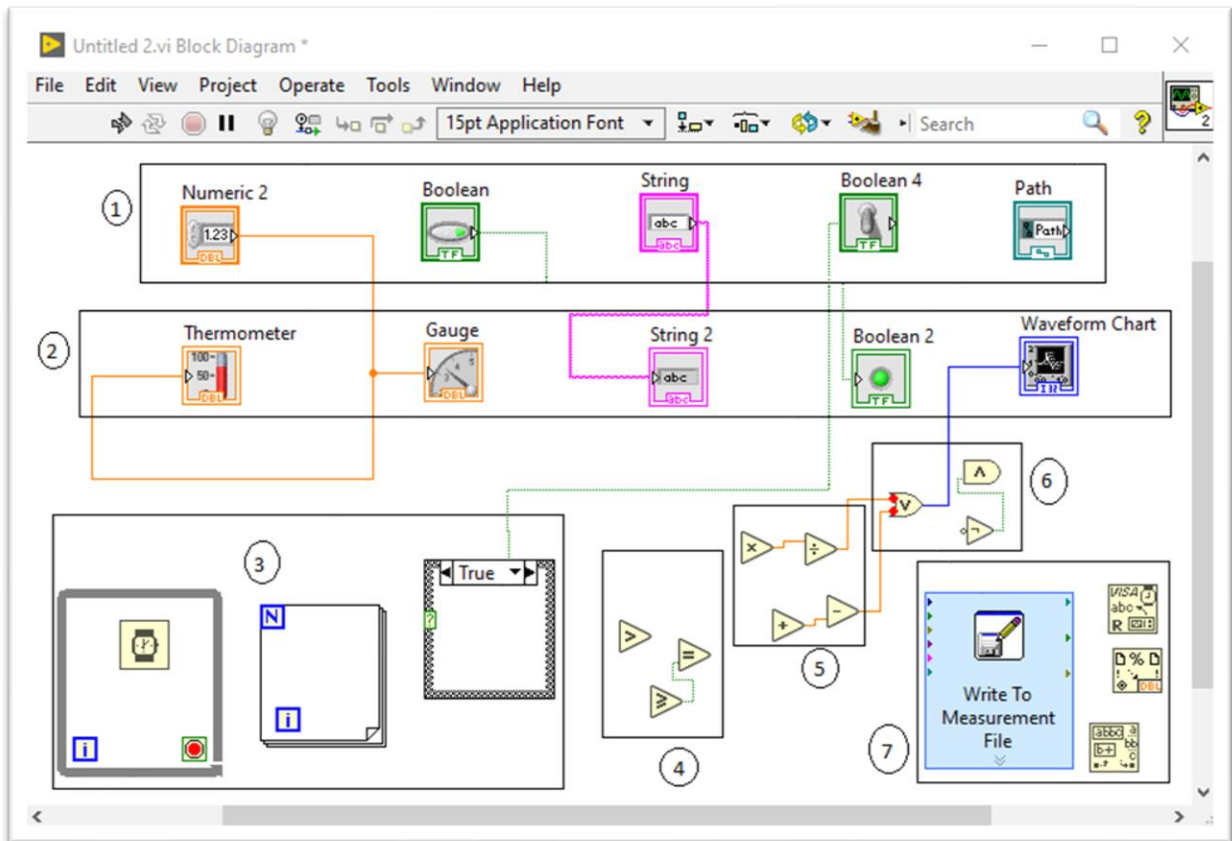


Figure III-20 Block diagramme, 1 : les contrôles, 2 : les indicateurs, 3 : les structures (les boucles, les conditions), 4 : outils de comparaison, 5 : opérations numériques, 6 : booléennes, 7 : les fonctions ou Vis.

#### III.3.4.4. L'acquisition et traitement de données par LabVIEW

L'acquisition de données par LabVIEW est un processus essentiel permettant de collecter des informations provenant de capteurs, d'instruments ou de systèmes. LabVIEW offre une large gamme d'outils et de bibliothèques pour faciliter cette acquisition de manière précise et efficace. Parmi ces bibliothèques, nous utilisons VISA (Virtual Instrument Software Architecture) dans LabVIEW. VISA est une bibliothèque logicielle intégrée à LabVIEW qui fournit des fonctionnalités (figure III.25) avancées pour la communication avec des instruments externes via les ports de l'ordinateur. Ces fonctions qui permettent de configurer et lire des données à partir d'instruments externes.

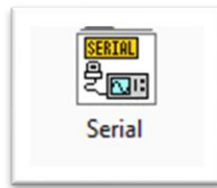


Figure III-21 VISA Serial.

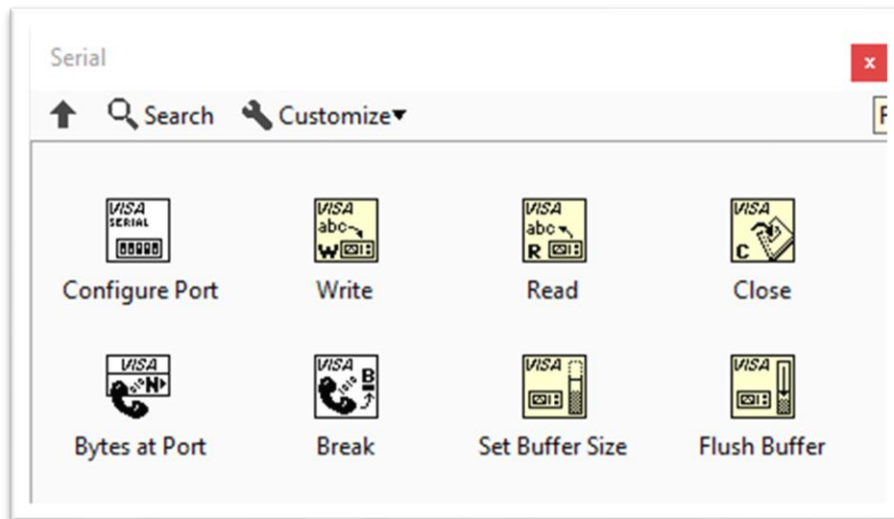


Figure III-22 les fonctions des VISA serial.

Dans LabVIEW, pour visualiser les données acquises, vous devez souvent convertir les valeurs textuelles en formes numériques. Cela peut être fait à l'aide de fonctions de conversion disponibles dans LabVIEW. Par exemple, si vous avez une chaîne de caractères contenant une valeur numérique, vous pouvez utiliser la fonction "Vers numérique" (figure III.27) pour la convertir en un type de données numérique approprié tel que "Flottant" ou "Entier". Cette conversion permettra d'effectuer des opérations mathématiques et de visualiser les données sous forme de nombres plutôt que de texte. Dans la bibliothèque de conversion de nombres/chaînes de caractères (Number/String Conversion) de LabVIEW, vous trouverez un ensemble de fonctions pour effectuer des conversions entre les types de données numériques et les chaînes de caractères.

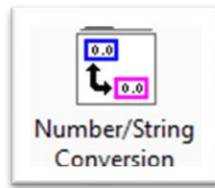


Figure III-23 Nombre/texte converti.

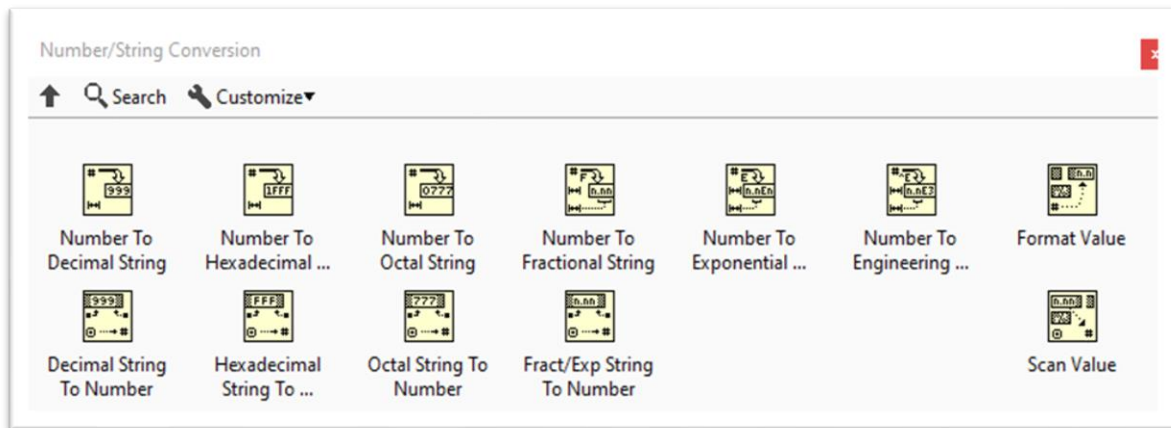


Figure III-24 Les fonctions des conversations.

En ce qui concerne l'enregistrement des données acquises, LabVIEW propose différentes méthodes. Vous pouvez utiliser des fonctions de lecture/écriture de fichiers (figure III.29) intégrées dans LabVIEW, telles que les fonctions de manipulation de fichiers texte ou binaire. Ces fonctions vous permettent de créer, ouvrir, écrire et fermer des fichiers de données dans différents formats.



Figure III-25 Fichier Bibliothèque d'input output.

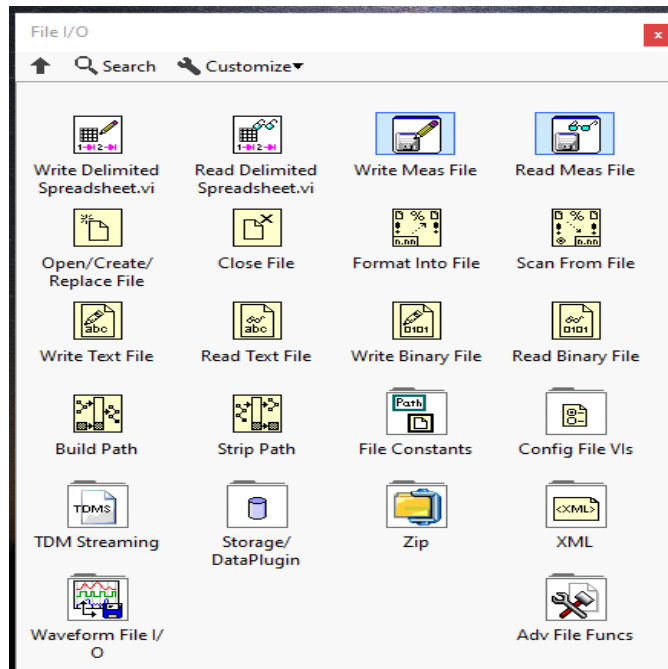


Figure III-26 Les fonctions du fichier Bibliothèques.

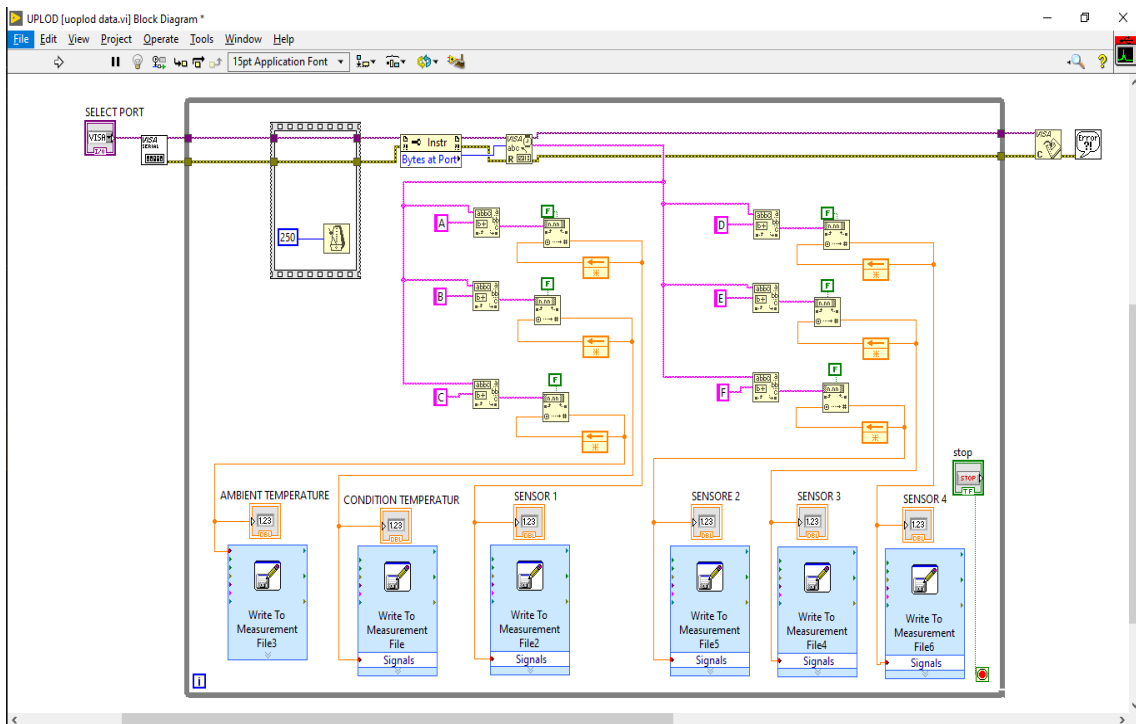


Figure III-27 Block diagramme de subVI qui lit les données et les enregistre dans un fichier txt

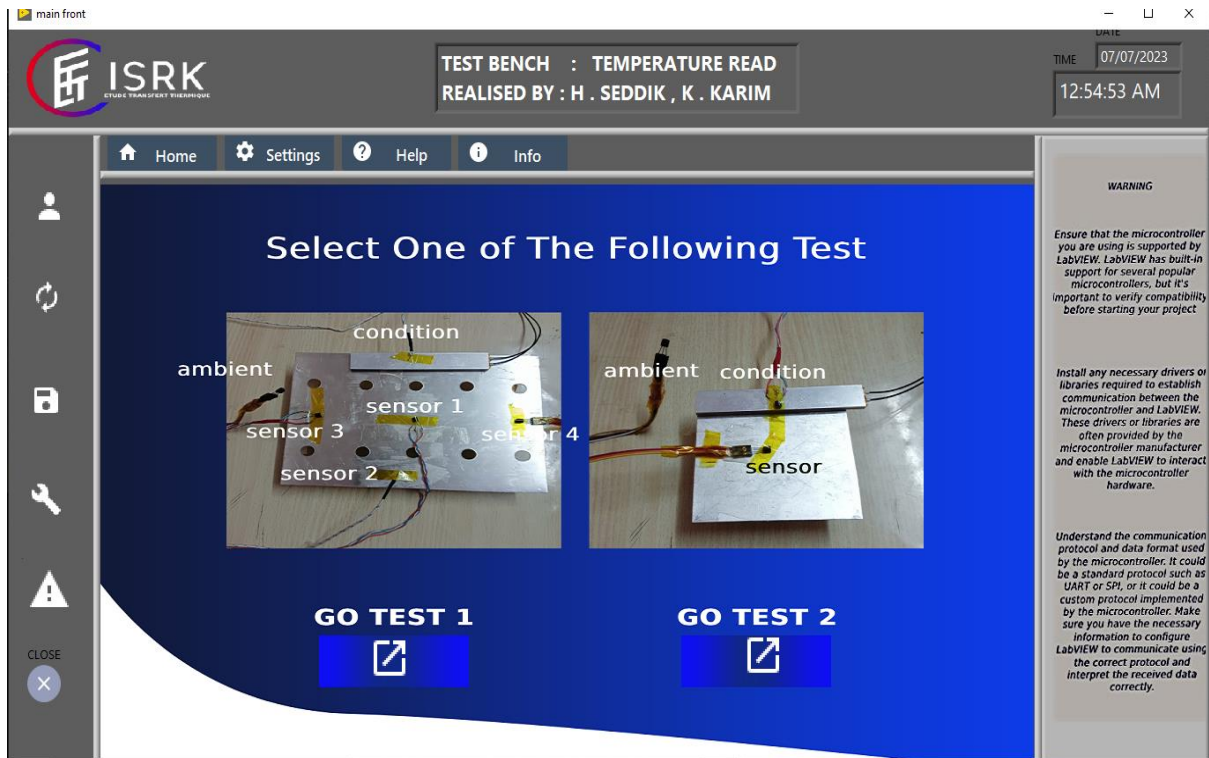


Figure III-28 Principale page d'application.

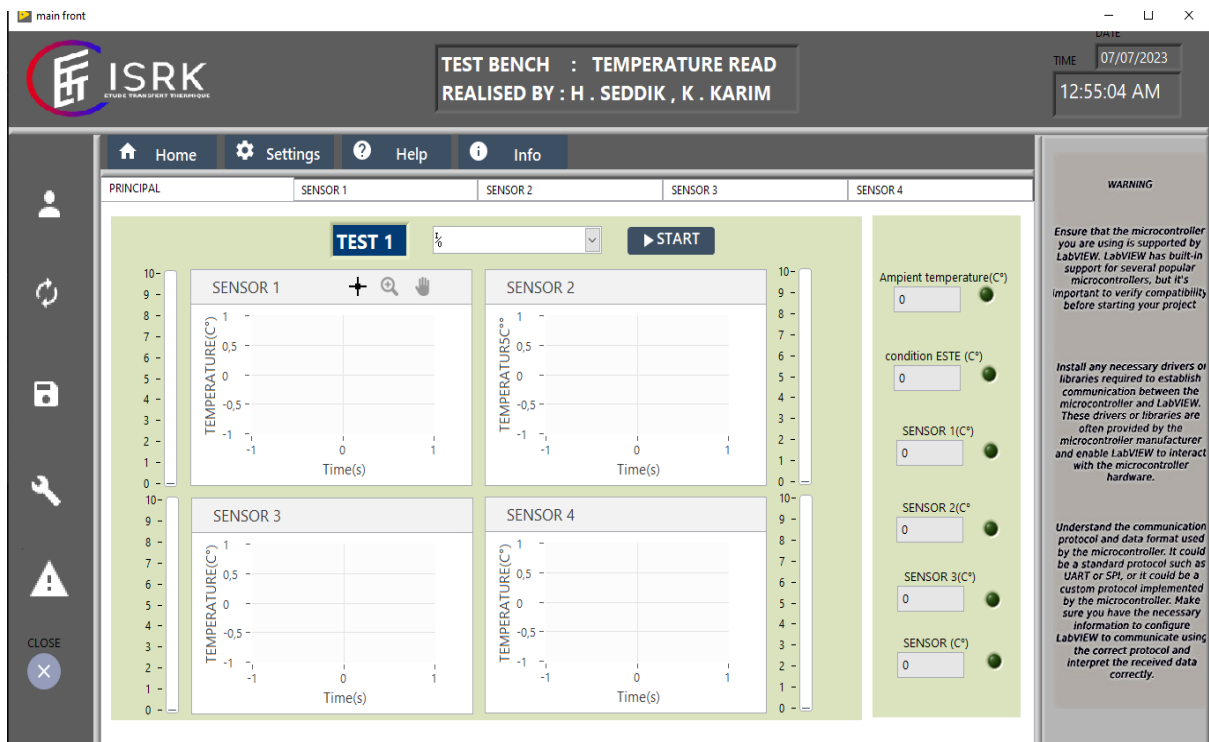


Figure III-29 Interface du test 1.



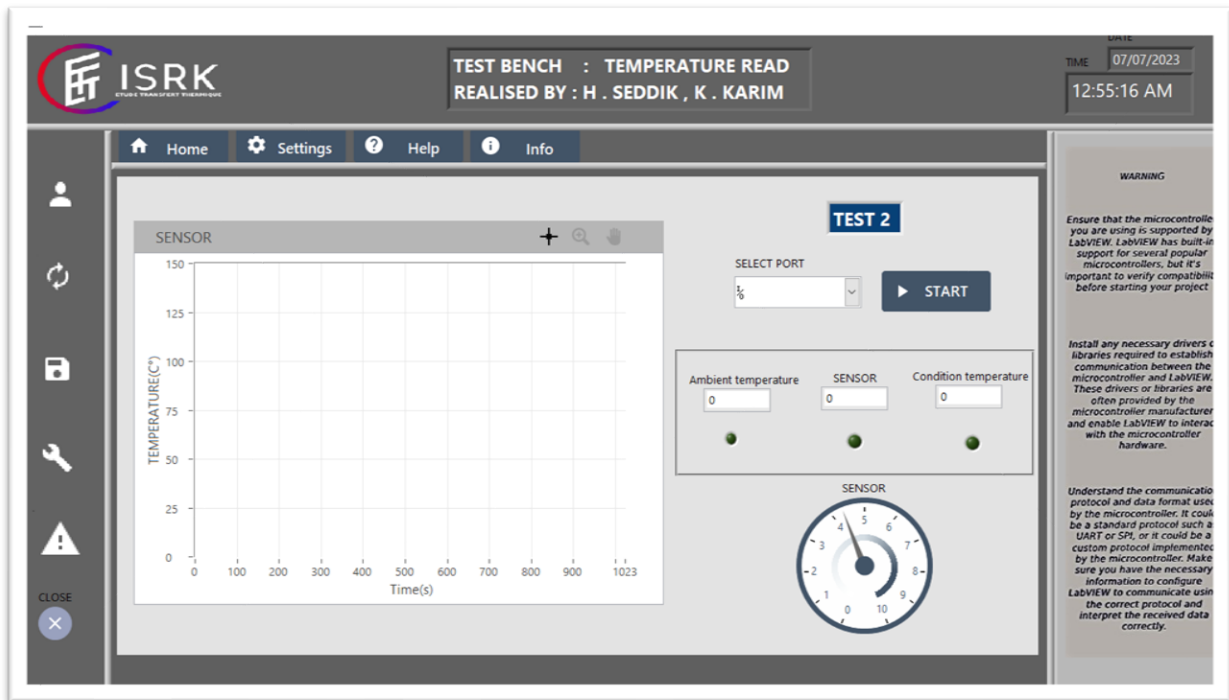


Figure III-30 Interface du test 2.

### III.4. Flux de données et Configuration expérimental

#### III.4.1. Circuit 1 (Figure III 31)

Dans notre configuration expérimentale, nous utilisons quatre capteurs DS18B20 pour mesurer la température. Pour compléter notre système de mesure, nous avons intégré le composant intermédiaire MAX6675, qui nous permet de mesurer la température à l'aide de thermocouples de type K. Le flux de données se déroule de la manière suivante :

Les quatre capteurs DS18B20 sont connectés aux broches d'entrée/sortie numériques de l'Arduino Uno. Grâce à la programmation spécifique de l'Arduino Uno, nous sommes en mesure de lire les valeurs de température à partir de ces capteurs. Pour mesurer la température à l'aide des thermocouples de type K, nous utilisons le MAX6675 comme convertisseur intégré. Les thermocouples de type K sont connectés au MAX6675, qui est ensuite connecté à l'Arduino Uno via une interface appropriée.

L'Arduino Uno est programmé pour communiquer avec le MAX6675 et récupérer les valeurs de température converties à partir des thermocouples. Le MAX6675 convertit les tensions générées par les thermocouples en valeurs de température et les transmet à l'Arduino

Uno. Une fois que l'Arduino Uno a récupéré les valeurs de température des capteurs DS18B20 et du MAX6675, il les envoie à l'ordinateur via la connexion USB.

Dans LabVIEW, nous créons une interface utilisateur qui reçoit les séries de données provenant de l'Arduino Uno. Nous utilisons soit le module LabVIEW pour Arduino, soit nous développons une communication série personnalisée dans LabVIEW pour recevoir et traiter ces données. Dans cette interface LabVIEW, nous pouvons visualiser, analyser et enregistrer les données de température provenant à la fois des capteurs DS18B20 et du MAX6675. Cette intégration nous permet d'obtenir une mesure complète et précise de la température dans notre étude expérimentale.

#### **III.4.2. Circuit 2 (Figure III 32)**

Pour le deuxième circuit comprenant le PIC, le FTDI FT232 et le capteur LM35, le flux de données est similaire. Le capteur LM35 est connecté au PIC, qui est programmé pour lire la température à partir du capteur. Le PIC communique ensuite avec le FTDI FT232, qui convertit les séries de données en données USB. L'ordinateur est connecté au FTDI FT232 via USB, et LabVIEW est utilisé pour recevoir les données de température converties. Nous devons programmer le PIC pour lire la température du capteur LM35 et communiquer avec le FTDI FT232 pour envoyer les données via USB (en utilisant le langage C). Dans LabVIEW, vous pouvez configurer une interface pour recevoir les données série converties en USB et les traiter selon vos besoins.

Pour simuler ces circuits et développer les programmes, vous pouvez utiliser Proteus, qui offre des outils de simulation et de développement pour les circuits électroniques. Vous pouvez créer les schémas des circuits dans Proteus, programmer les microcontrôleurs (Arduino Uno et PIC) dans l'environnement de développement approprié, et simuler le flux de données de capteur jusqu'à LabVIEW en utilisant les fonctionnalités de simulation de Proteus. Cela vous permettra de valider le fonctionnement de vos circuits et de développer les programmes nécessaires avant de les implémenter dans le matériel réel.

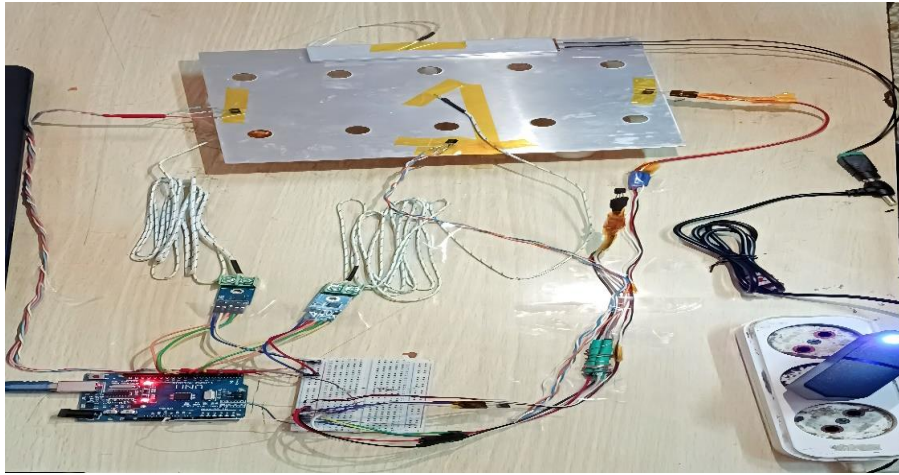


Figure III-31 Circuit 1.

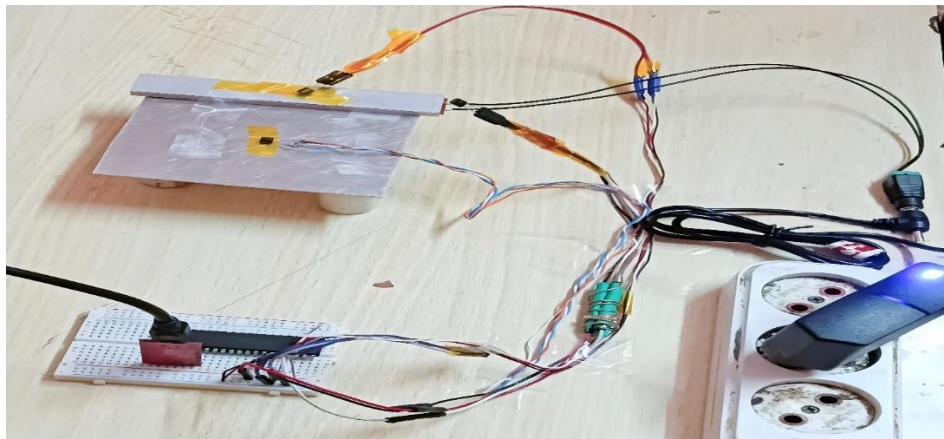


Figure III-32 Circuit 2

### III.5. Conclusion

Pour conclure, les outils et logiciels exposés dans ce chapitre jouent un rôle fondamental dans la réalisation d'une étude expérimentale de qualité. Leur utilisation permet de simplifier et d'optimiser les différentes étapes du processus de recherche, garantissant ainsi des résultats fiables et pertinents.

**CHAPITRE IV**  
**RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons et discuterons les résultats de notre étude sur le transfert de chaleur dans les structures poreuses, en nous basant sur la mesure des profils de température. Afin d'obtenir des résultats fiables et précis, nous avons combiné des approches expérimentales et numériques en utilisant le logiciel Patran/Nastran. Première partie de ce chapitre concerne la présentation des résultats de la simulation numérique 2D réalisée à l'aide des logiciels NASTRAN/PATRAN. Nous analyserons par la suite les effets des différents paramètres, tels que la taille des pores et la distribution des pores, le nombre des pores et le type de Matériau sur le transfert de chaleur dans les structures poreuses. Les résultats numériques nous permettront de comprendre les tendances générales et les comportements thermiques spécifiques associés à chaque paramètre. Dans la deuxième partie du chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus à partir des mesures de profils de température réalisées sur des échantillons de structures poreuses, en variant les paramètres structuraux pour capturer différentes configurations de structures poreuses. Les mesures expérimentales serviront à valider les prédictions numériques et à évaluer la précision de notre modèle de transfert de chaleur. En combinant les résultats de simulation numérique et les mesures expérimentales, nous pourrions formuler des conclusions robustes sur l'impact des paramètres structuraux sur le transfert de chaleur dans les structures poreuses

### IV.2. Modèles considérés

Les résultats obtenus dans cette étude mettent l'accent sur la comparaison du transfert de chaleur entre une plaque simple et des plaques poreuses de différentes configurations. La principale différence entre ces configurations réside dans les caractéristiques des pores, telles que le nombre de pores ( $n$ ), le diamètre des pores ( $\emptyset$ ), la position des pores sur l'axe  $x$  et la forme des pores. Figure IV.1 présente les modèles physiques utilisés. Les résultats obtenus dans cette étude représentent le profil de température du nœud situé au centre de la plaque.

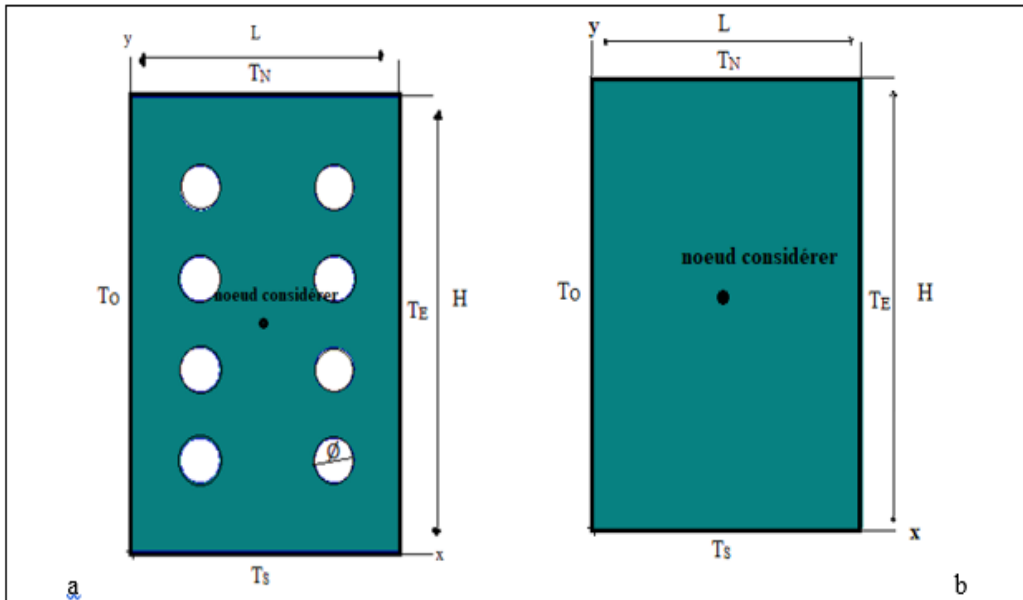


Figure IV-1 Modèles physiques. (a) plaque poreuse, (b) plaque simple.

(CL1 :  $T_W = 270\text{C}^\circ$ ,  $T_E = T_N = T_S = 20\text{C}^\circ$ , CL2 :  $T_W = T_E = 270\text{C}^\circ$ ,  $T_N = T_S = 20\text{C}^\circ$ ).

### IV.3. Résultats Numériques

#### IV.3.1. Etude de l'indépendance du maillage

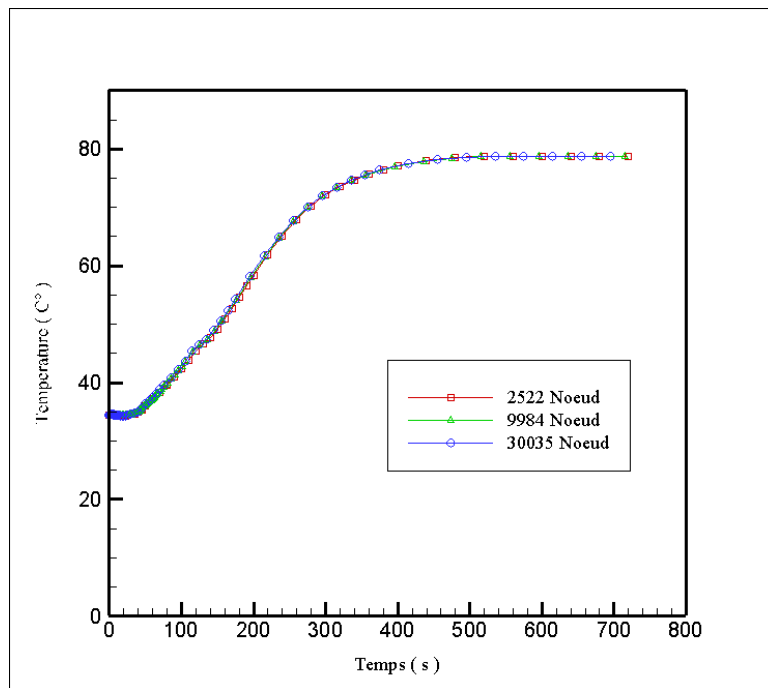


Figure IV-2 Résolution pour différents maillages de plaque trouée en aluminium (20 trous) de dimensions (0.1×0.1 m)

La validation de l'indépendance du maillage constitue une étape essentielle dans notre simulation numérique, étant donné son impact direct sur la précision et la fiabilité des résultats obtenus. Dans le cadre de notre projet, nous avons mis en place une série d'analyses approfondies visant à vérifier que notre maillage est suffisamment indépendant pour assurer des solutions robustes. Cela implique l'exécution de simulations multiples avec différentes résolutions de maillage, suivies d'une comparaison minutieuse des résultats obtenus. Les conclusions de cette étude nous permettent d'affirmer avec confiance que notre maillage est indépendant et que nos simulations numériques fournissent des résultats fiables et cohérents, renforçant ainsi la validité de notre approche (Figure IV.3).

### **IV.3.2. Effet des paramètres**

#### **IV.3.2.1. Nombre de trous**

Dans le but de montrer l'influence du nombre de trous sur le transfert thermique dans les plaques poreuses (plaques d'aluminium de  $(0.2*0.3\text{m})$  et d'épaisseur  $(0.002\text{ m})$ ). Nous présentons également des graphes en isothermes pour illustrer la distribution de la température pour deux différentes conditions limites étudiées

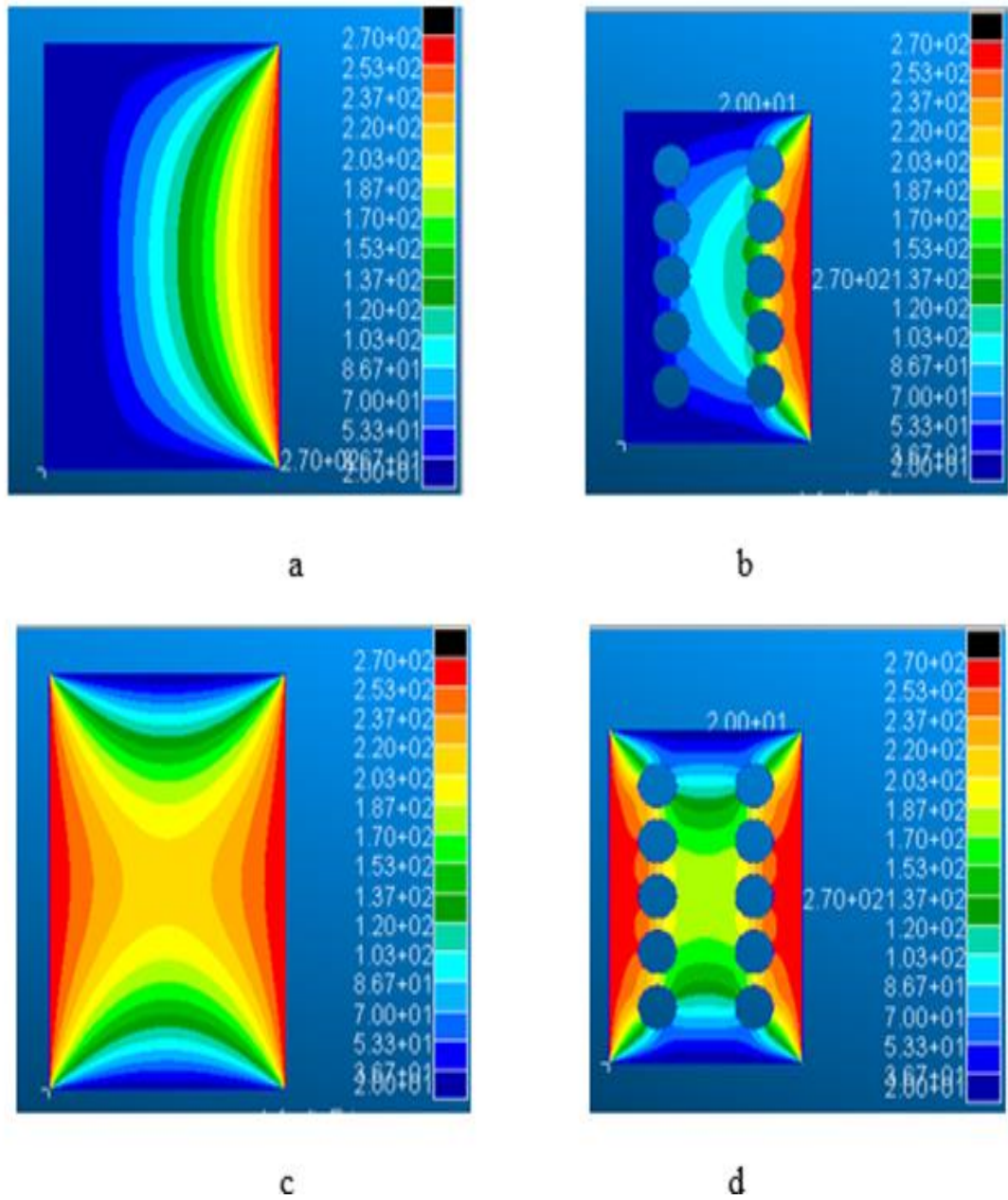


Figure IV-3 la distribution de température pour la première condition aux limites : (a) sur une plaque simple, (b) sur une plaque poreuse. La distribution de température pour la deuxième condition aux limites : (c) sur une plaque simple, (d) sur une plaque poreuse



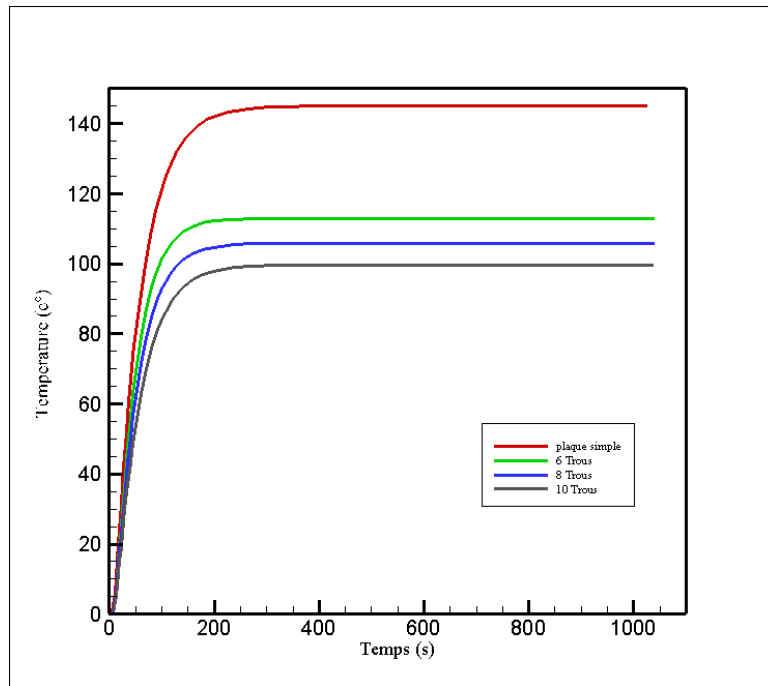


Figure IV-4 Profils de températures au nœud considéré pour la 1ère condition aux limites et différents nombres de trous pour un diamètre de 0.04 m.

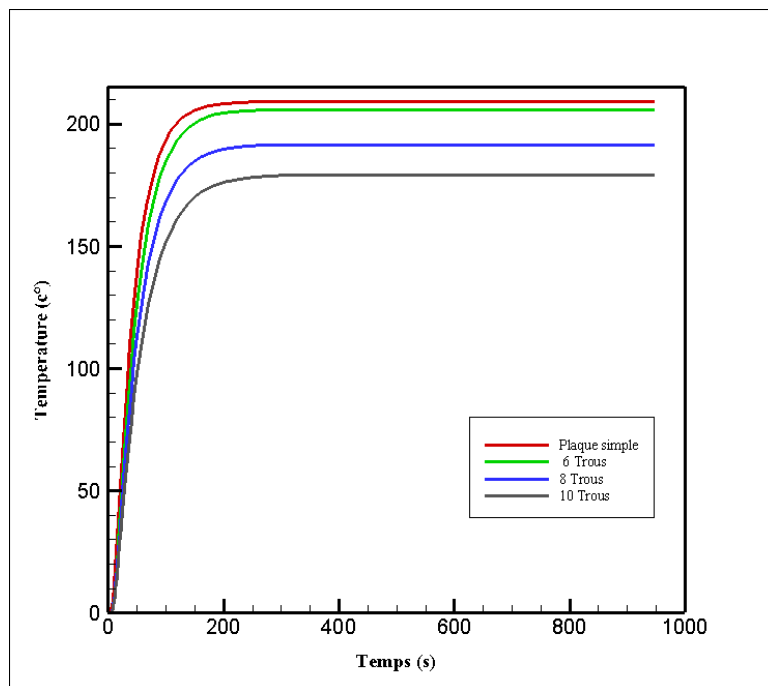


Figure IV-5 Profils de températures au nœud considéré pour la 2ème condition aux limites et différents nombres des trous pour un diamètre de 0.04 m.

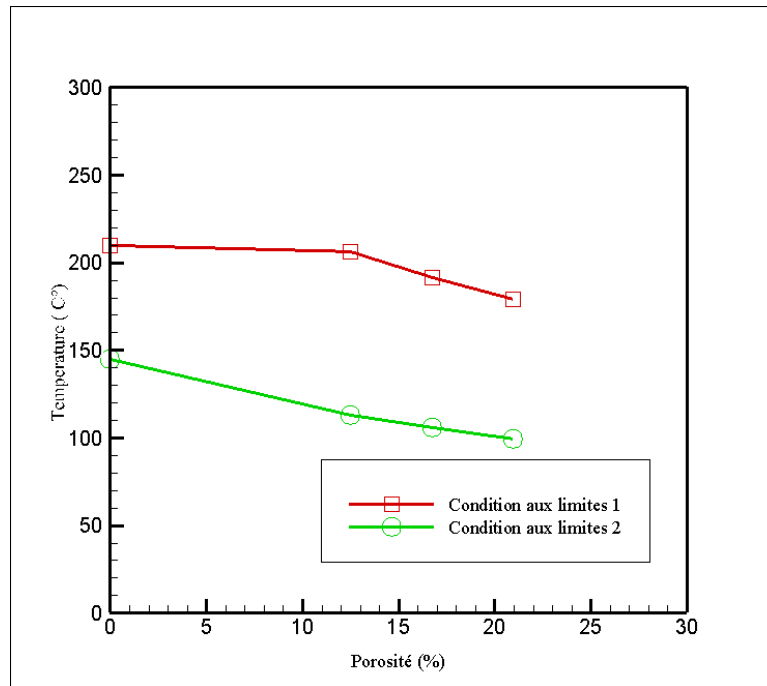


Figure IV-6 Profils de température en fonction des porosités pour deux conditions aux limites.

Table IV.1 Résultats obtenus pour différentes conditions aux limites et différents nombres de trous.

	Nombre de trous	Porosité (%)	$T_{Max}$ (C°)	Différence entre $T_{plaquesimple}$ et $T_{plaque\ trouée}$ (%)
<b>CL1</b>	0	0	210.11	-
	6	12.50	206.02	1.94
	8	16.75	191.65	8.78
	10	20.94	179.21	14.70
<b>CL2</b>	0	0	145	-
	6	12.50	112.98	22.08
	8	16.75	105.82	27.02
	10	20.94	99.61	31.30

La Figure IV.3, représente une comparaison entre des plaques sans trous (a, c) et des plaques avec trous (b, d) pour différentes conditions aux limites. On remarque qu'on a un meilleur refroidissement pour le cas des plaques trouées.

Les figures IV.4 et IV.5 montrent que la température diminue en augmentant le nombre des trous.

D'un autre côté, dans la figure IV.6, on a confirmé que pour les deux exemples de conditions aux limites la température sur les plaques diminue en augmentant le pourcentage de porosité sur ces derniers.

Le tableau IV.1 montre que pour les deux conditions aux limites la température de la plaque simple est plus grande que celle des plaques poreuses.

En augmentant le nombre de trous de 0 jusqu'à 10, la température diminue et prend une valeur maximale égale à 179.21 C° pour la première condition aux limites, et 99.61 C° Pour la deuxième condition aux limites.

Un plus grand nombre de pores augmente la surface spécifique disponible pour l'échange thermique. Cela signifie qu'il y a plus de zones de contact entre le matériau poreux et le fluide qui s'écoule à travers les pores. Lorsque le fluide s'écoule à travers les pores, il y a une augmentation de la surface d'échange thermique entre le fluide et la structure. Cela permet un transfert de chaleur plus efficace, ce qui peut diminuer la température de la structure.

Un plus grand nombre de pores peut favoriser la convection thermique à l'intérieur de la structure poreuse. Lorsque les pores sont nombreux et bien interconnectés, le fluide peut circuler plus facilement à travers la structure, facilitant ainsi la convection. La convection thermique implique le transfert de chaleur par le mouvement du fluide. Une meilleure convection peut aider à éliminer la chaleur de la structure, contribuant ainsi à une diminution de la température.

De plus, un plus grand nombre de pores permet une meilleure dissipation thermique. Les pores fournissent des voies d'évacuation pour la chaleur, ce qui empêche l'accumulation excessive de chaleur dans la structure poreuse. Cela peut contribuer à maintenir une température plus basse dans la structure.

La présence d'un grand nombre de pores peut également influencer la conductivité thermique apparente de la structure poreuse. La conductivité thermique apparente est une mesure de la capacité d'un matériau à transférer la chaleur. Lorsque les pores sont nombreux, ils peuvent réduire la conductivité thermique globale de la structure, car les pores remplis d'air ou de gaz peuvent avoir une conductivité thermique inférieure à celle du matériau solide. Cette réduction de la conductivité thermique peut affecter la distribution de la température à travers la structure.

#### IV.3.2.2. Diamètre des trous

Dans cette partie, on a fixé les conditions aux limites des plaques utilisées (CL1). En premiers lieu, on prend des dimensions de (0.2×0.3 m) et on passe du nombre de trous (8) au nombre de trous (50) en variant le diamètre des trous dans les deux cas. Après on prend des dimensions de plaques plus petites (0.1×0.1 m) et (0.05×0.05 m) et on fixe le nombre de trous (8) en variant toujours le diamètre des trous.

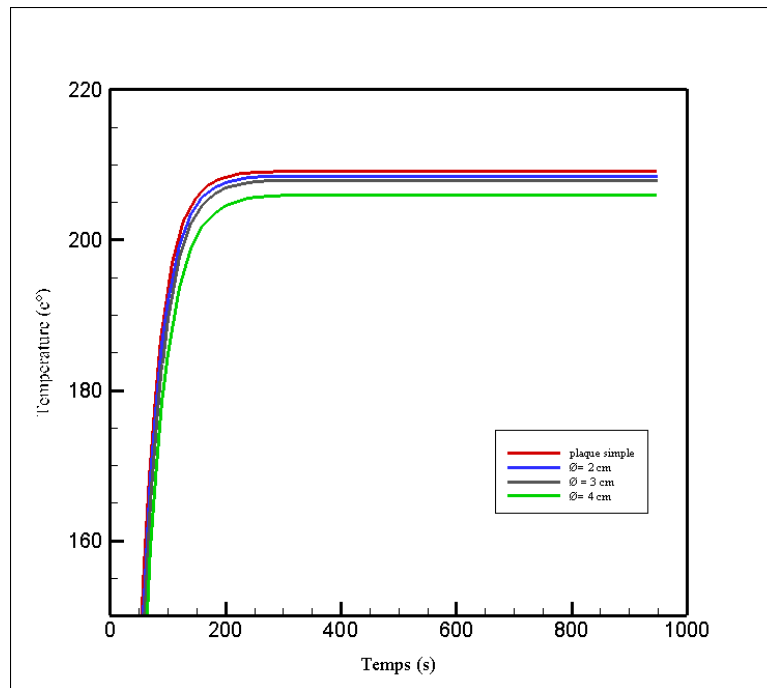


Figure IV-7 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 6 pour une plaque de dimensions (0.2×0.3 m).

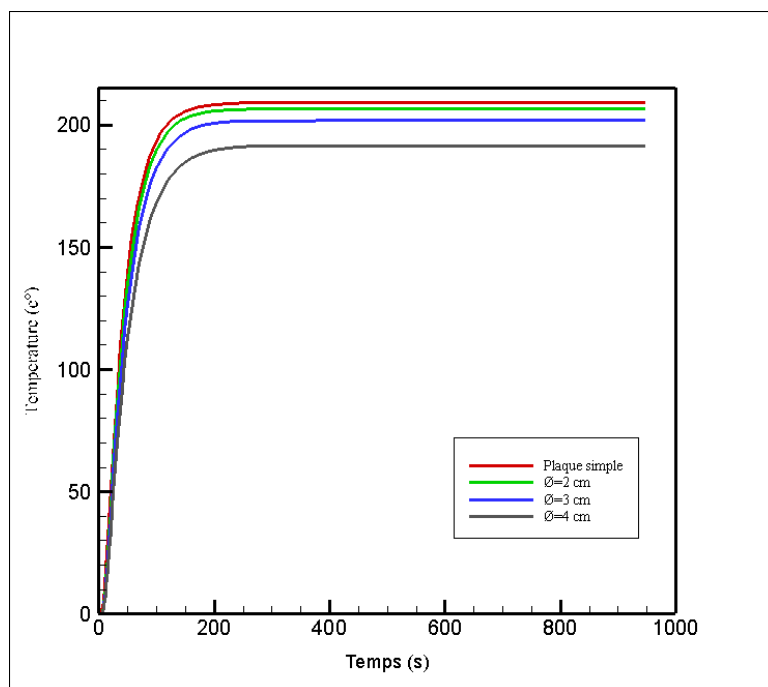


Figure IV-8 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 8, pour une plaque de dimensions (0.2× 0.3 m).

Table IV.2 Résultats obtenus pour différents diamètres de trous.

Nombre de trous	Diamètre (Cm)	Porosité (%)	T <sub>Max</sub> (C°)	Différence entre T <sub>plaque simple</sub> et T <sub>plaque trouée</sub> (%)
<b>0</b>	-	0	210.11	-
<b>6</b>	2	3.14	208.53	0.75
	3	7.06	207.96	1.02
	4	12.56	206.02	1.94
<b>8</b>	2	4.18	206.71	1.61
	3	9.42	201.83	3.94
	4	16.74	191.65	8.78

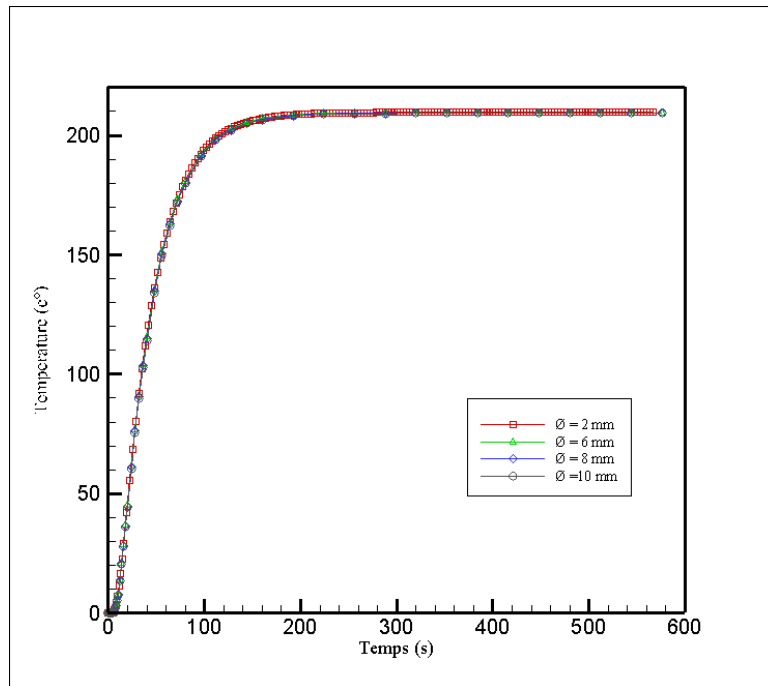


Figure IV-9 Profils de températures pour différents diamètres de trous (en mm) et un nombre de trous d'égale à 8, pour une plaque de dimensions (0.2×0.3 m).

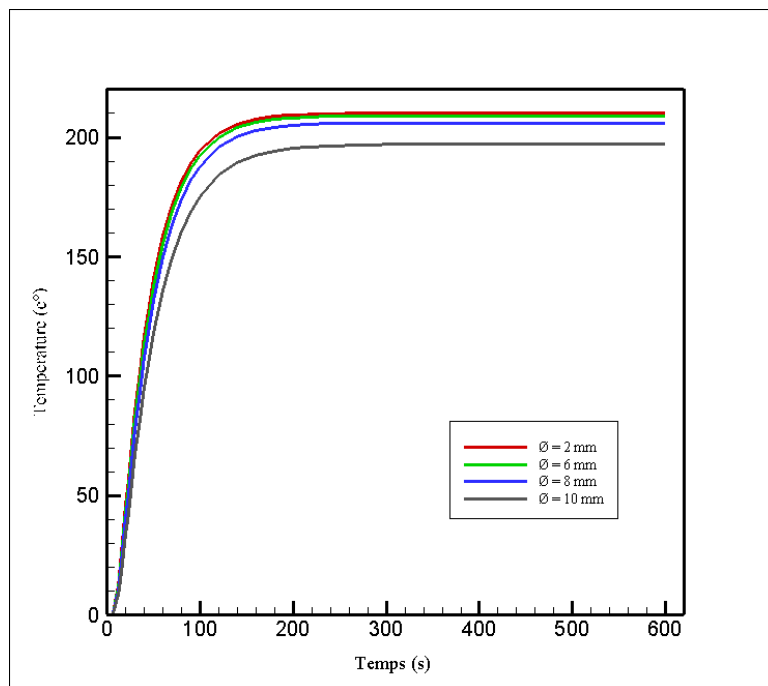


Figure IV-10 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 50, pour une plaque de dimensions (0.2×0.3 m).

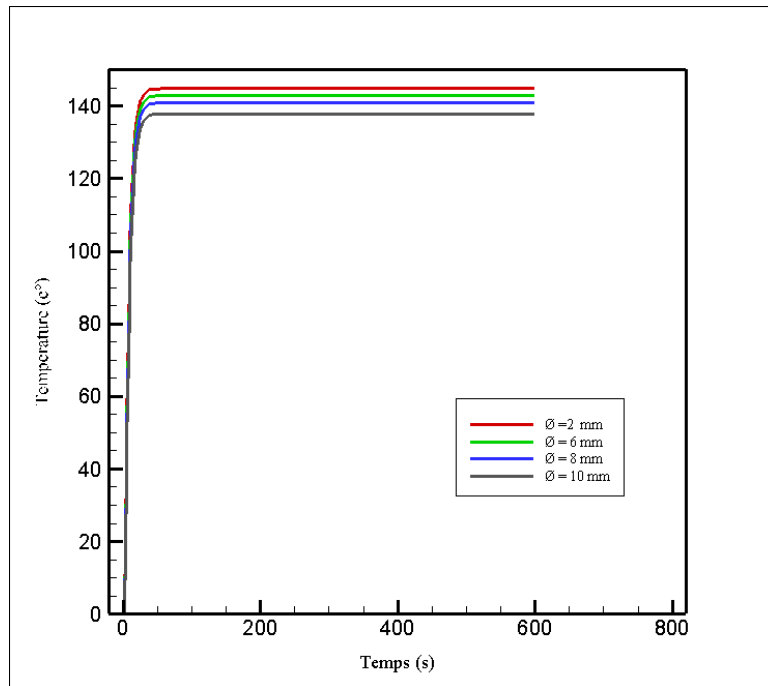


Figure IV-11 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 8, pour une plaque de dimensions (0.1×0.1 m).

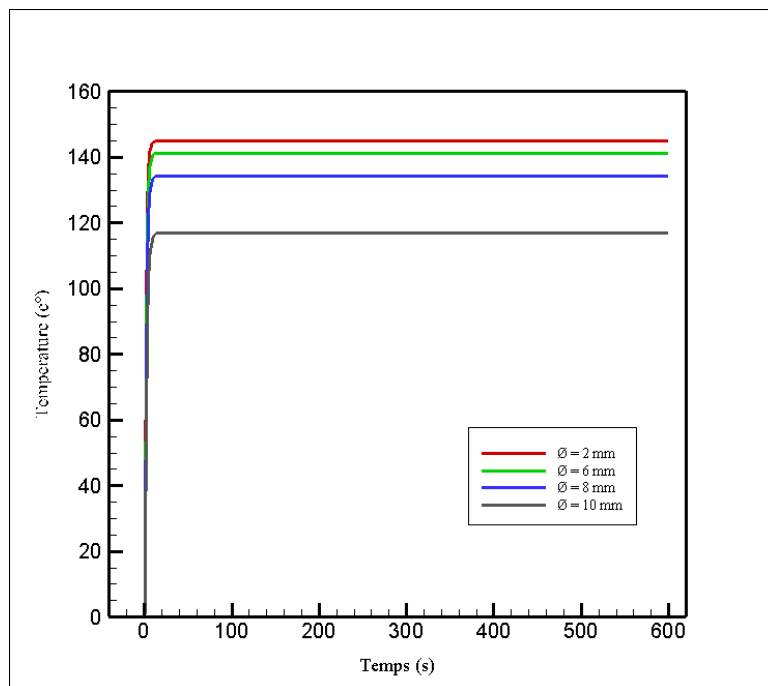


Figure IV-12 Profils de températures pour différents diamètres de trous et un nombre de trous égale à 8, pour une plaque de dimensions (0.05×0.05 m).

Table IV.3 Résultats obtenus pour différentes conditions aux limites et différents diamètres de trous.

Dimensions (Cm)	Nombre de trous	Diamètre (mm)	Porosité (%)	T <sub>Max</sub> (C°)	Différence entre T <sub>plaque simple</sub> et T <sub>plaque trouée</sub> (%)
<b>(20x30)</b>	0	-	0	210.11	-
	8	2	0.041	209.63	0.22
		6	0.37	209.50	0.29
		8	0.67	209.23	0.41
		10	1.05	209.13	0.46
	50	2	0.25	209.12	0.47
		6	2.35	208.97	0.54
		8	4.17	205.97	1.97
10		6.55	197.04	6.22	
<b>(10x10)</b>	8	2	0.25	144.79	-
		6	2.25	142.85	1.33
		8	4	140.86	2.71
		10	6.28	137.83	4.80
<b>(5x5)</b>	8	2	1	144.93	-
		6	9.04	141.26	2.53
		8	16.07	134.39	7.34
		10	25.07	117.02	19.25

Les figures IV.7 à IV.12 illustrent la variation de la température en fonction du temps, pour différentes valeurs de diamètre et pour différentes dimensions de la plaque.

Pour les figures IV.7 et IV.8 qui représentent les grandes dimensions de la plaque (0.2×0.3 m), on remarque que la température diminue par l'augmentation du diamètre des trous, par exemple en fixant ce dernier à 4 cm la température passe de la valeur 210.11 C° à la valeur 206.02 C° pour un nombre de trous égale à 6 et à la valeur 191.95 C° Pour un nombre de trous égale à 8.

Dans la figure IV.9 on a une surface trouée faible par rapport à la surface de la plaque et on remarque qu'on n'a pas obtenus une grande différence de température en passant d'un diamètre à un autre, en revanche en augmentant le nombre de trous de 8 jusqu'à 50 pour les dimensions de la plaque (0.2×0.3 m) les températures diminuent considérablement (figure IV.10).

Les figures IV.11 et IV.12, représentent des plaques de dimensions (0.1×0.1 m) et (0.05×0.05 m) respectivement. Dans ces figures on remarque qu'en diminuant les dimensions des plaques la porosité augmente et cela induit que la température diminue drastiquement



(Tableau IV.3). Donc on déduit que le pourcentage de la porosité est plus important que le diamètre lui-même.

Le Tableau IV.3 montre que dans les structures poreuses, le diamètre des pores joue un rôle crucial dans le transfert thermique. On remarque qu'en augmentant le diamètre des trous en augmente aussi la porosité, en revanche les températures diminuent. On déduit que le diamètre de ces pores a un impact significatif sur le transfert thermique. Ce qui peut être expliqué par le fait que lorsque le diamètre des pores est faible dans une structure poreuse, on parle de régime de transport par conduction. Dans ce cas, le transfert thermique est principalement dû à la conduction thermique à l'intérieur du matériau solide constituant la structure poreuse. Les interactions moléculaires entre les particules du matériau sont responsables de la diffusion de la chaleur à travers la structure. Dans ce régime, le diamètre des pores a moins d'influence sur le transfert thermique, car la conduction thermique est principalement contrôlée par les propriétés du matériau solide.

Cependant, lorsque les pores deviennent plus larges, le régime de transport thermique peut passer à un régime de convection. La convection thermique implique le transfert de chaleur par le mouvement du fluide à travers les pores. Dans ce cas, le diamètre des pores devient crucial, car il détermine la vitesse d'écoulement du fluide à travers la structure poreuse. Un plus grand diamètre de pore permet un écoulement plus facile du fluide, ce qui peut entraîner une convection plus efficace et donc un transfert thermique amélioré.

En outre, le diamètre des pores peut également influencer la surface disponible pour le transfert thermique. Une plus grande surface spécifique est associée à des pores de diamètre plus petit, ce qui permet une plus grande interaction entre le fluide et les parois des pores. Cela conduit à une augmentation de l'échange thermique entre le fluide et la structure poreuse, favorisant ainsi le transfert thermique.

#### **IV.3.2.3. Distribution de trous**

Dans cette partie, on prend un nombre de trou égal à 50 et un diamètre égal à 8 mm pour la première condition aux limites, et on change le positionnement des trous suivant l'axe X. Donc par la suite on va fixer une variable 'x' qui représente la distance entre les trous et les interfaces Est et West.

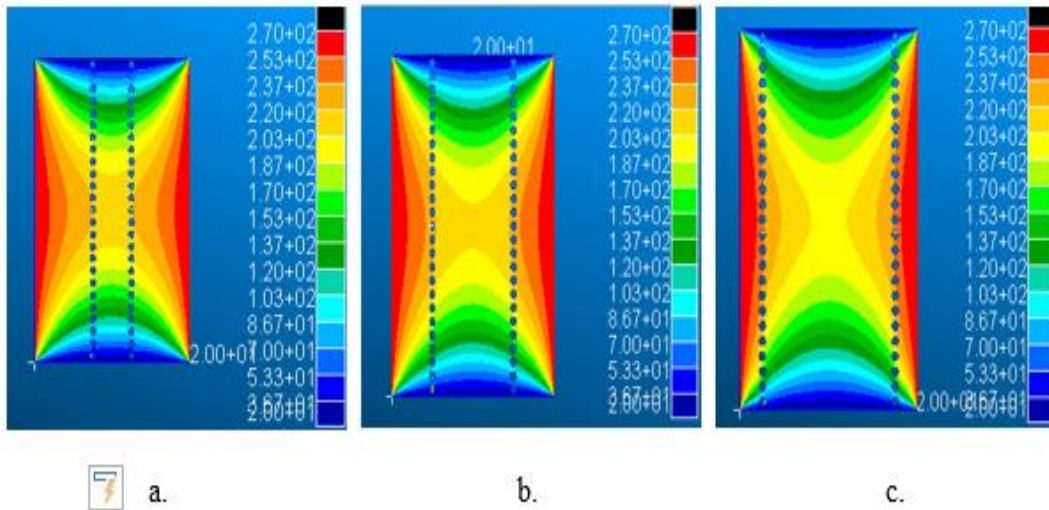


Figure IV-13 La distribution de température pour différent positionnement des trous : (a)  $x=0.075$  m, (b)  $x=0.05$  m, (c)  $x=0.025$  m.

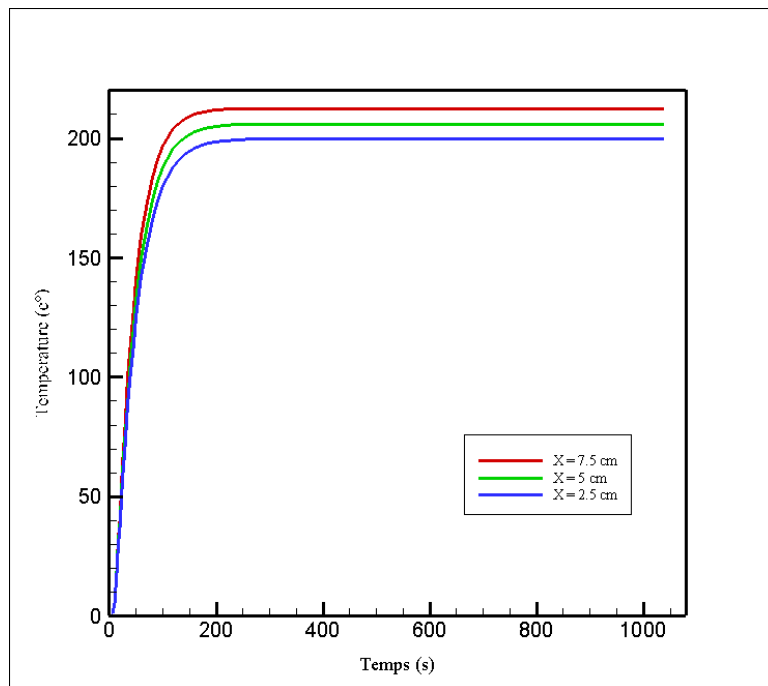


Figure IV-14 profils de températures pour différentes positions de trous (plusieurs positions sur l'axe "x").

La Figure IV.13 représente le graphe des isothermes des températures pour différent positionnement des trous, et la figure IV.13 .C ( $x=0.025$  m), représente le cas le plus favorable pour avoir un meilleur refroidissement.

La figure IV.14montre l'effet de la distribution des trous sur le transfert de chaleur. Elle représente la variation des positions des trous en fonction du temps pour plusieurs positions.

Pour une distribution avec  $x=0.075$  m, la température maximale est atteinte la valeur de  $210.12\text{ C}^\circ$ , en revanche pour une distribution avec  $x=0.025$  m la température est minimale est atteint la valeur  $197.88\text{ C}^\circ$ .

Donc on conclut qu'une distribution proche des frontières où les conditions aux limites sont appliquées favorise la diminution de la capacité de transport de température.

La distribution spatiale des pores est également un facteur important. Une distribution uniforme des pores à travers la plaque poreuse peut permettre une répartition homogène de la chaleur. Cependant, une distribution non uniforme des pores peut entraîner des variations locales de la température. Par exemple, si la concentration de pores est plus élevée dans certaines régions de la plaque, ces zones peuvent présenter une conductivité thermique plus élevée, ce qui conduit à une dissipation de chaleur plus importante. En conséquence, la distribution des pores peut provoquer des gradients de température à travers la plaque.

#### IV.3.2.4. La forme des pores

Dans cette partie, On fixe le nombre de trous à (26) et à chaque fois on change la forme de ces trous mais en gardant la même surface. Les formes utilisées sont : cercle, carré, et triangle.

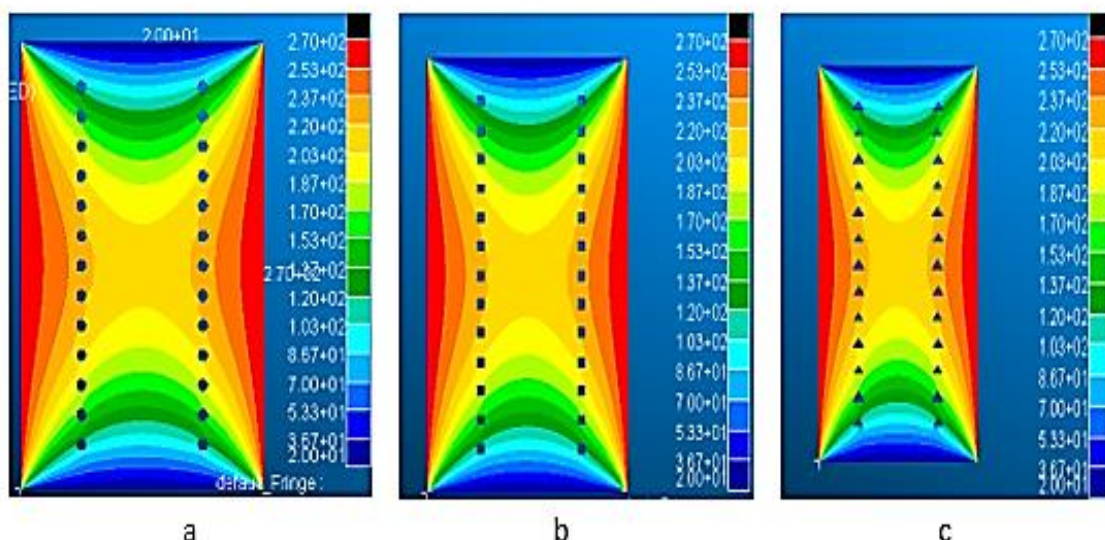


Figure IV-15 Distribution de température pour différentes formes de trous : (a) cercle, (b) Carré, (c) triangle.

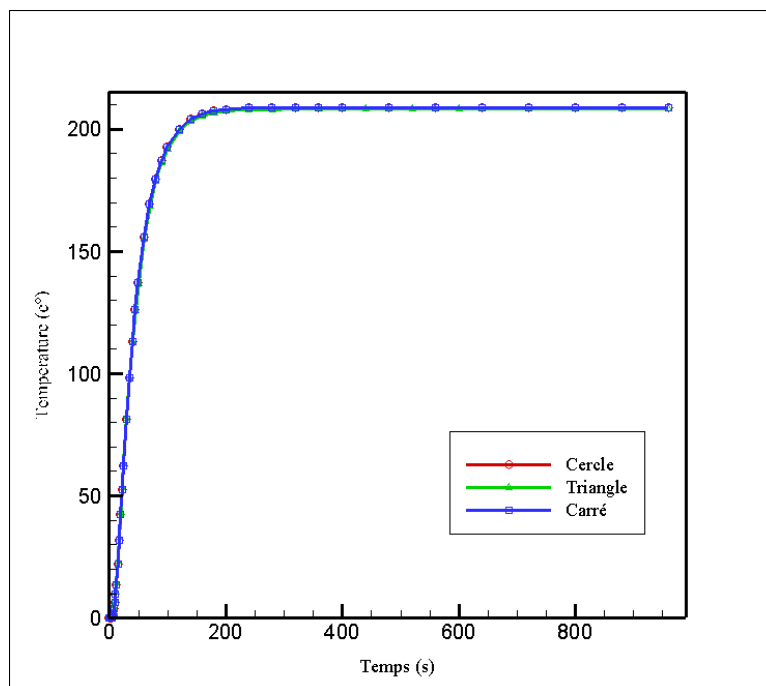


Figure IV-16 Profils de températures pour différentes formes de trous.

La Figure IV.15 représente le graphe des isothermes de température sur une plaque trouée pour différentes formes de trous : cercle, carré, triangle. On constate dans les figures IV.15(a, b, c) que les isothermes sont identiques dans les trois cas.

La Figure IV.16 illustre la variation de température en fonction du temps pour différentes formes de pores et on remarque aussi qu'on n'a pas obtenu un changement dans les profils de températures lorsque on change la forme des pores, Pour toutes les formes la température reste à l'alentour de 208.21 C°.

La forme du trou n'influe pas sur le transfert thermique dans les structures poreuses, le paramètre le plus important qui influe sur la température des plaques est la surface des pores, (la porosité), comme on a précédemment constaté.

#### IV.3.2.5. Le matériau utilisé

Dans cette partie, on fixe les dimensions de la plaque, le nombre de trous (8), le diamètre (0.04m), et on change le matériau, on prend des matériaux de différentes caractéristiques (Cuivre, Aluminium, Acier, titane).

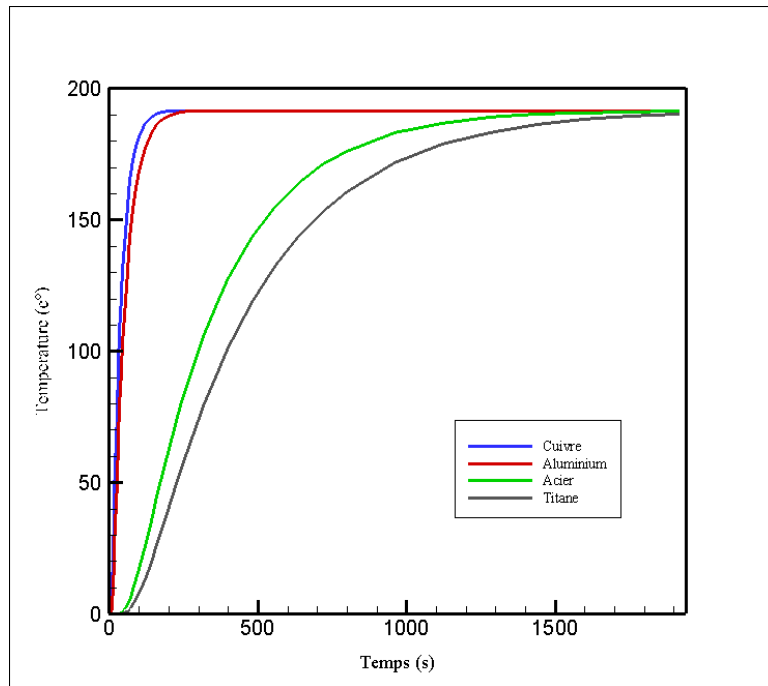


Figure IV-17 Profils de températures pour différents matériaux pour la 1ère condition aux limites

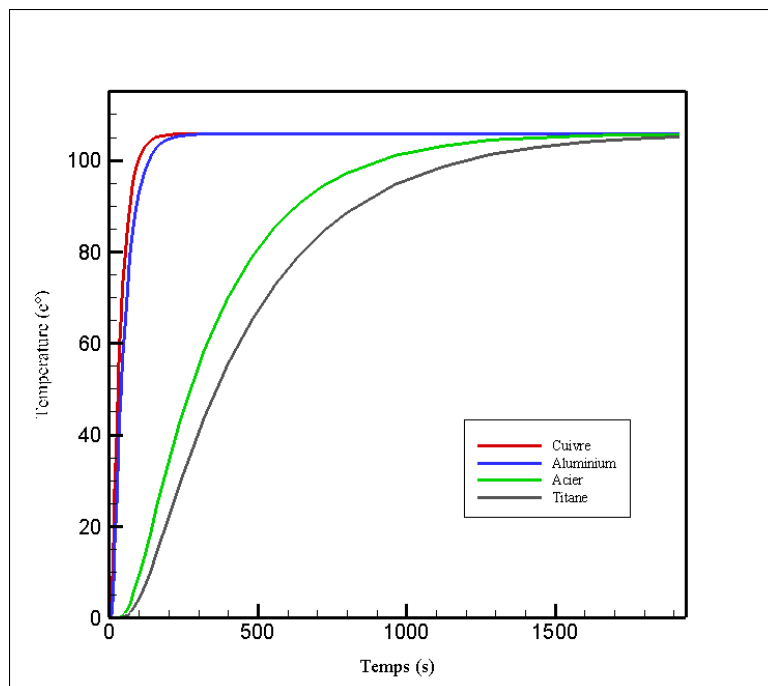


Figure IV-18 Profils de températures pour différents matériaux pour la 2ème condition aux limites

Les figures IV.17 et IV.18 illustrent la variation de température en fonction du temps pour différents matériaux et pour deux différentes conditions aux limites.

On remarque que pour les métaux avec haute conductivité thermique (Aluminium, cuivre), la température augmente et se stabilisent à la température 106.22 C° rapidement, en

revanche les métaux avec faible conductivité (acier et titane) thermique la température augmente mais lentement.

Donc on conclut que, le matériau utilisé dans les structures poreuses joue un rôle essentiel dans le transfert thermique en raison de ses propriétés intrinsèques. Parmi ces propriétés :

La conductivité thermique du matériau qui détermine la capacité du matériau à conduire la chaleur à travers lui. Les matériaux ayant une conductivité thermique élevée permettent un transfert de chaleur plus rapide par rapport aux matériaux ayant une conductivité thermique faible. Par conséquent, un matériau à conductivité thermique élevée favorisera un transfert thermique plus efficace dans les structures poreuses.

La capacité thermique d'un matériau détermine la quantité de chaleur qu'un matériau peut absorber ou libérer lors du transfert thermique. Un matériau avec une capacité thermique élevée peut stocker davantage de chaleur, ce qui peut influencer le temps de réponse du matériau aux variations de température et le taux de transfert thermique dans les structures poreuses.

#### **IV.3.2.6. Les résultats expérimentaux**

Dans notre étude, nous avons utilisé des données expérimentales comme point de référence pour valider et ajuster les paramètres de notre simulation réalisée avec Patran/Nastran. Les résultats obtenus à partir des expérimentations ont été utilisés pour calibrer les conditions et les propriétés de la simulation, afin d'assurer une meilleure concordance entre les deux approches. Les conditions aux limites, telles que la température ambiante (33 C° à 35 C°), a été déterminée en se basant sur les mesures expérimentales. Concernant le coefficient de convection  $h$  on le prend  $10 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Ces données ont été intégrées à la simulation afin de reproduire les mêmes conditions dans l'environnement virtuel de Patran/Nastran. De plus, les caractéristiques des matériaux utilisées dans la simulation (aluminium, titane). Ont été ajustées en se référant aux valeurs expérimentales. Cela nous a permis d'obtenir une meilleure représentation des propriétés des matériaux dans la simulation, en se rapprochant le plus possible des conditions réelles observées lors des expérimentations. En utilisant les résultats expérimentaux comme guide, nous avons pu améliorer la précision et la fiabilité de notre simulation par Patran Nastran. Cette approche itérative nous a permis d'affiner les paramètres de simulation afin d'obtenir une meilleure corrélation entre les résultats simulés et les mesures expérimentales. En réalisant plusieurs maillages de différentes

résolutions et en exécutant les simulations correspondantes, nous avons pu évaluer l'impact de la résolution du maillage sur les résultats thermiques observés dans les expérimentations, Ces tests nous ont permis de déterminer que les résultats étaient Robustes et indépendants de la résolution du maillage.

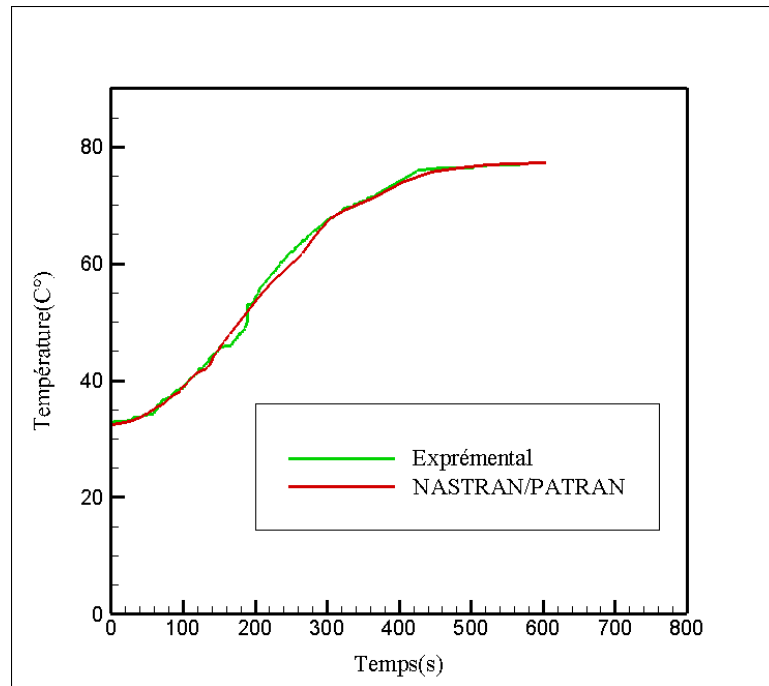


Figure IV-19 Profils de température d'une plaque simple en aluminium de dimensions (0.1×0.1 m) obtenues par la simulation et par la partie expérimentale

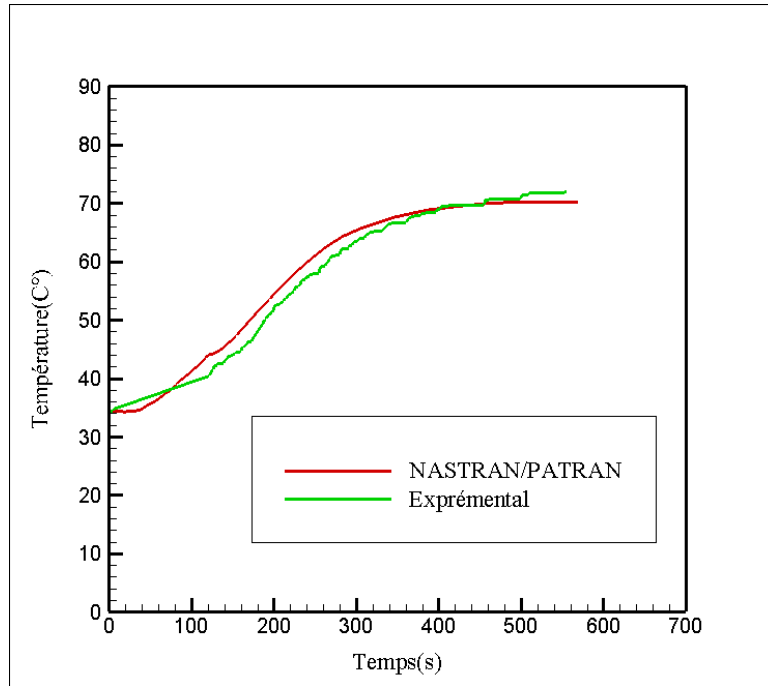


Figure IV-20 Profils de température d’une plaque trouée en aluminium de dimensions (0.1×0.1 m), pour (20 trous), de diamètre (0.005 m) obtenues par la simulation et par la partie expérimentale.

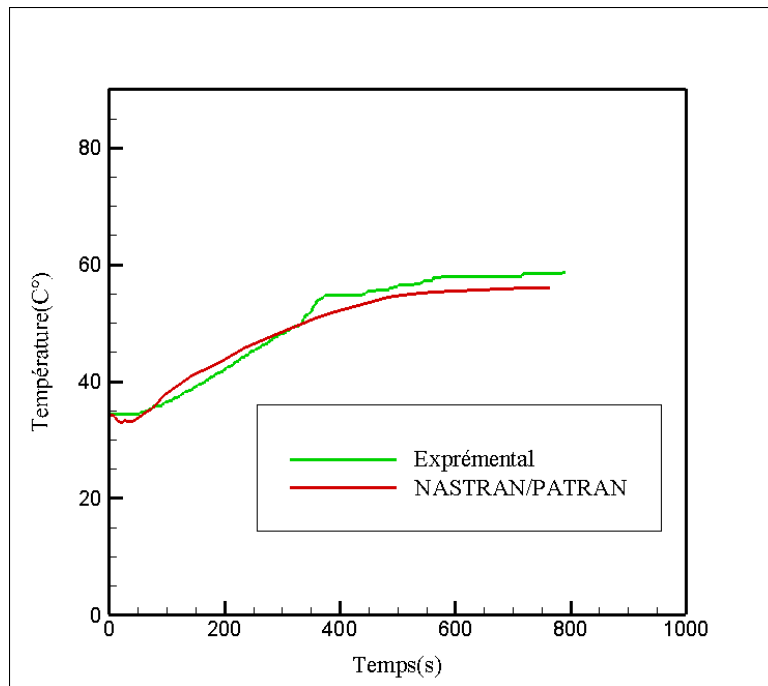


Figure IV-21 Profils de température d’une plaque trouée en aluminium, de dimensions (0.15×0.2 m), pour (10 trous), de diamètre (0.11 m) obtenues par la simulation et par la partie expérimentale.



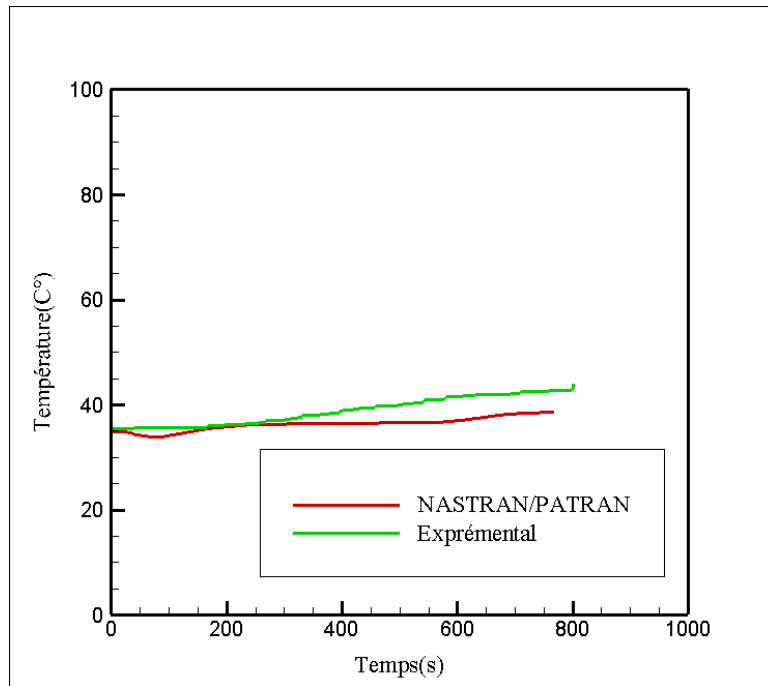


Figure IV-22 Profils de température d'une plaque trouée en titane, de dimensions (0.15×0.2 m), pour (10 trous), de diamètre (0.11 m), obtenues par la simulation et par la partie expérimentale.

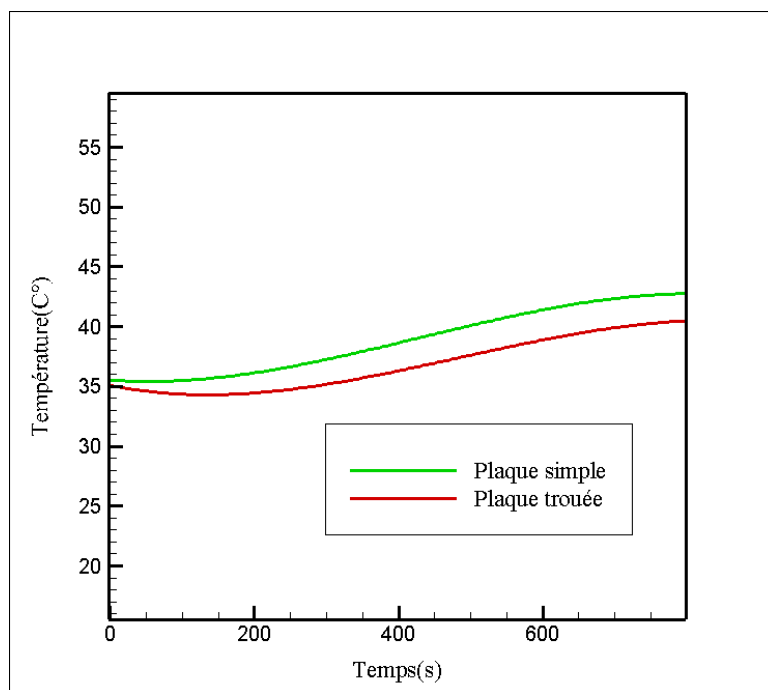


Figure IV-23 Profils de température sur une plaque simple en titane de dimensions (0.15×0.2 m) et sur une autre plaque trouée de 10 trous.

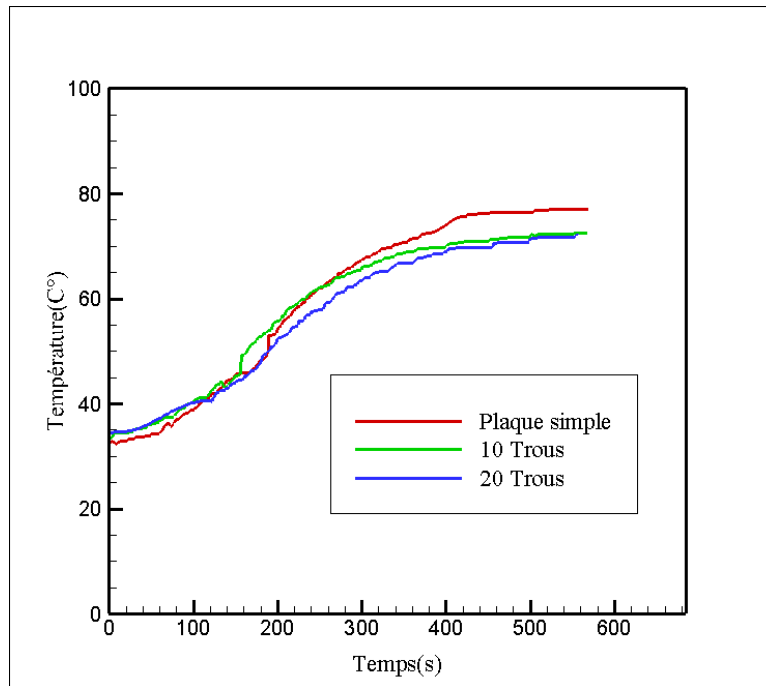


Figure IV-24 Profils de température d'une plaque en aluminium pour différents nombres de trous obtenus par la partie expérimentale.

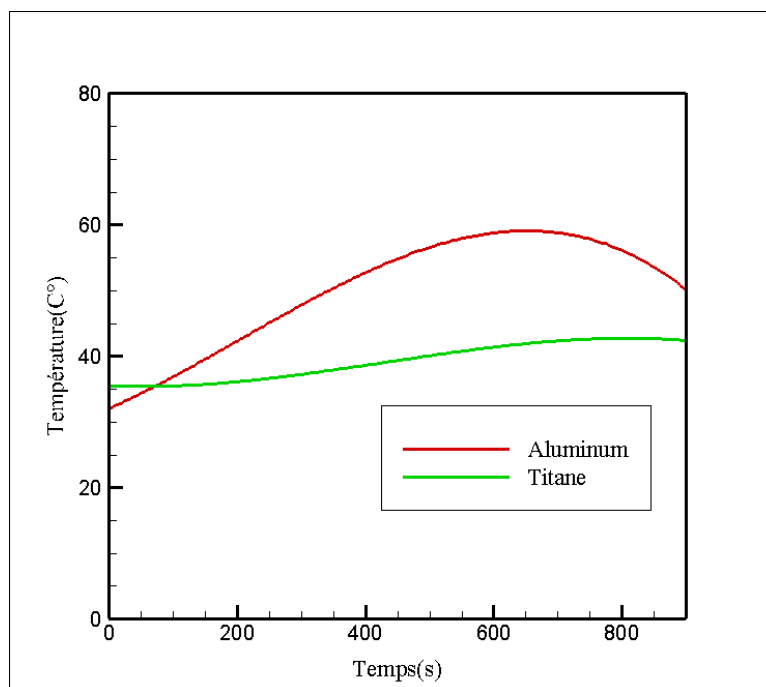


Figure IV-25 Profils de température pour deux différents matériaux pour des dimensions de (0.15×0.2 m), de 10 trous, et de diamètre 0.11 m obtenus par la partie expérimentale.

La comparaison entre les résultats de simulation et d'expérimentation dans l'analyse et les investigations thermiques des structures poreuses révèle une remarquable convergence (de la Figure IV.19 à IV.22). Cette concordance renforce la validité et la fiabilité des résultats

obtenus, ainsi que la confiance dans les conclusions de l'étude. Voici certains éléments importants à souligner dans cette comparaison :

#### 1) Correspondance des profils thermiques

Les profils thermiques obtenus à partir de la simulation par Patran/ Nastran et des mesures expérimentales présentent une correspondance étroite. Les variations de température observées dans les structures poreuses pour différentes configurations sont cohérentes entre les deux approches. Cette corrélation démontre que la simulation est capable de reproduire avec précision les comportements thermiques observés dans les expériences (de la Figure IV.19 à IV.22).

De plus, dans la figure IV.23, on remarque que la température sur une plaque trouée est plus faible par rapport à la température sur une plaque sans trous.

La figure IV.24, montre que la température est plus importante pour une plaque sans trous et elle diminue respectivement pour un nombre de trous égale à 10 puis à 20. Donc on conclut qu'en augmentant le nombre de trous la température diminue.

#### 2) Convergence des valeurs numériques

Les résultats numériques, tels que les températures maximales, montrent une convergence entre la simulation et les expériences. Les valeurs obtenues à partir de la simulation par Patran / Nastran et des mesures expérimentales sont proches, témoignant ainsi d'une bonne concordance entre les deux approches (de la figure IV.19 jusqu'à la figure IV.22). Cette convergence renforce la validité des résultats et suggère une capacité prédictive satisfaisante de la simulation.

Il est important, cependant, de prendre en compte les limitations et les sources d'erreur associées à chaque approche. Bien que les résultats soient proches, il est essentiel de discuter de ces limitations pour une évaluation critique des résultats. Parmi ces limitations, on peut citer :

- Précision des capteurs

La précision des capteurs utilisés pour mesurer les paramètres pertinents peut être sujette à des limitations. Des imperfections dans les capteurs ou des variations dans les conditions de mesure peuvent entraîner une certaine marge d'erreur dans les données recueillies.

- Sources d'alimentation des outils

Dans le cadre des expérimentations, les outils et les dispositifs utilisés peuvent nécessiter une alimentation électrique pour fonctionner. Toutefois, la stabilité de cette alimentation peut varier, entraînant ainsi des fluctuations potentielles dans les résultats expérimentaux. Des mesures appropriées doivent être prises pour minimiser ces variations.

- Incertitude du transfert des données de capteurs vers le PC

Le processus de transfert des données collectées par les capteurs vers l'ordinateur pour l'analyse peut également introduire une certaine incertitude. Des problèmes de transmission ou d'interférences peuvent affecter la qualité des données enregistrées, ce qui pourrait influencer les résultats finaux.

En prenant en compte ces limitations et sources d'erreur, nous sommes en mesure de réaliser une évaluation complète des résultats obtenus à partir de la simulation et des expérimentations. Cette analyse critique renforce la validité des conclusions de l'étude et permet une meilleure compréhension de l'influence des paramètres étudiés sur les propriétés thermiques des structures poreuses.

#### **IV.4. Conclusion**

Ce chapitre, présente les résultats obtenus à partir des simulations et des expérimentations, et une comparaison entre les deux résultats à été faite. Ces résultats sont essentiels pour répondre à nos objectifs d'étude et fournissent une base solide pour comprendre le phénomène étudié. La comparaison entre les deux approches met en évidence les similitudes et les différences, permettant ainsi une meilleure appréciation des forces et des limites de chaque méthode. Ces résultats ouvrent la voie à de futures réflexions et à des pistes de recherche supplémentaires.

## CONCLUSION GENERALE

Après avoir réalisé une étude approfondie sur les analyses et investigations thermiques dans des structures poreuses, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

L'effet des paramètres de structure poreuse : Les paramètres tels que le diamètre de trous, le nombre des trous, la forme et la distribution des pores ont un impact significatif sur les propriétés thermiques des structures poreuses. À travers nos simulations réalisées avec les logiciels NASTRAN/PATRAN, nous avons pu observer comment chaque paramètre influe sur la conductivité thermique et la diffusion de chaleur dans les structures poreuses. Il est essentiel de prendre en compte ces paramètres lors de la conception et de l'optimisation de telles structures. Les principales déductions sont :

- Quand le nombre des pores augmente la température sur les plaques diminue.
- Le diamètre des pores joue un rôle crucial dans le transfert thermique. On remarque qu'en augmentant le diamètre des trous on augmente aussi la porosité, en revanche les températures diminuent.
- La forme du trou n'influe pas sur le transfert thermique dans les structures poreuses, le paramètre le plus important qui influe sur la température des plaques est la surface des pores (la porosité).
- On remarque que pour les métaux avec haute conductivité thermique (Aluminium, cuivre), la température augmente et se stabilisent rapidement.

En outre, pour confirmer la fiabilité de nos résultats de simulation, nous avons fait une partie expérimentale qui nous a permis de comparer les deux résultats. Nous avons constaté que les résultats de simulation étaient en accord étroit avec les résultats expérimentaux, ce qui renforce la crédibilité de nos analyses. Cela suggère que les logiciels NASTRAN/PATRAN sont des outils efficaces pour prédire et comprendre le comportement thermique des structures poreuses.

On conclue, que notre étude sur l'analyse thermique dans des structures poreuses, nous a permis de comprendre en détail l'effet des paramètres de structure sur les performances thermiques. Les simulations réalisées avec les logiciels NASTRAN/PATRAN ont été validées par des expériences, ce qui a renforcé notre confiance dans les résultats obtenus. Ces connaissances ont une valeur pratique pour le développement de nouvelles structures poreuses

optimisées thermiquement, ouvrant ainsi la voie à des applications améliorées dans divers domaines.

Après une étude approfondie sur les analyses thermiques dans des structures poreuses, plusieurs perspectives de recherche émergent. Optimiser les paramètres de structure des matériaux poreux serait une première piste, en déterminant les combinaisons idéales de diamètre, nombre de trous et distribution des pores pour maximiser leurs performances thermiques dans des applications spécifiques.

Une exploration plus poussée de nouveaux matériaux poreux aux propriétés thermiques diverses pourrait également ouvrir de nouvelles perspectives pour des applications industrielles ou biomédicales. L'intégration de l'analyse thermique avec d'autres aspects physiques, tels que la mécanique des fluides ou les propriétés mécaniques, permettrait de mieux comprendre les interactions complexes dans les structures poreuses, avec des implications dans la filtration ou les réactions chimiques.

Des études de transfert de masse en plus du transfert de chaleur élargiraient les possibilités d'application des structures poreuses dans la séparation sélective de gaz ou la libération contrôlée de substances actives.

Enfin, appliquer ces connaissances dans des domaines spécifiques comme l'aérospatiale, l'électronique, la médecine ou l'énergie permettrait d'améliorer les performances des dispositifs existants grâce à des structures poreuses optimisées thermiquement.

## **ANNEXE**

### **Projet start up**

#### **INTRODUCTION**

Le transfert thermique revêt une importance particulière dans les domaines de l'ingénierie et de la science, car il est essentiel pour concevoir des systèmes efficaces et fiables. Que ce soit pour le refroidissement des moteurs, le chauffage des habitations, la dissipation de la chaleur dans les circuits électroniques ou même le fonctionnement des centrales électriques, une bonne compréhension des mécanismes de transfert thermique permet d'optimiser les processus, de minimiser les pertes d'énergie et d'améliorer la performance globale des systèmes.

Cependant, malgré l'importance évidente du transfert thermique, il est parfois négligé ou sous-estimé dans certains contextes. Certaines industries ou secteurs d'activité peuvent ne pas accorder une attention suffisante au transfert thermique, ce qui peut entraîner des inefficacités énergétiques, des coûts élevés ou même des problèmes de sécurité. Il est donc crucial de sensibiliser et d'éduquer les acteurs concernés sur l'importance du transfert thermique et les avantages qu'une meilleure compréhension et maîtrise peuvent apporter.

Dans cette optique, nous proposons une opportunité de créer une startup spécialisée dans l'étude du transfert thermique. Fournissant des services complets et personnalisés à nos clients. Nous comprenons l'importance cruciale du transfert thermique dans de nombreux domaines, tels que l'ingénierie, l'industrie, la recherche et le développement. Notre objectif est d'offrir des solutions de haute qualité et précises pour répondre aux besoins spécifiques de nos clients. Aussi développer de nouvelles technologies dans ce domaine

## **I. DESCRIPTION DE L'ENTREPRISE ET DE SES ACTIVITES**

Notre entreprise est un bureau d'études spécialisé dans le domaine du transfert thermique. Nous avons rassemblé une équipe multidisciplinaire d'ingénieurs et de chercheurs expérimentés qui partagent une passion commune pour l'innovation et la résolution de problèmes complexes liés à la chaleur. Nous sommes passionnés par l'innovation et la recherche de nouvelles approches pour améliorer les performances thermiques des systèmes. Nous restons constamment à l'affût des avancées technologiques et des tendances émergentes dans le domaine du transfert thermique, afin de fournir à nos clients des solutions à la pointe de la technologie.

En tant que bureau d'études, notre objectif est de travailler en étroite collaboration avec nos clients pour comprendre leurs besoins spécifiques et leur fournir des recommandations adaptées. Nous sommes conscients que chaque projet est unique, et nous nous efforçons de trouver des solutions sur mesure qui répondent aux exigences techniques, économiques et environnementales.

### **A. Recherche et développement**

Notre premier pilier d'activité consiste à mener des recherches approfondies dans le domaine du transfert thermique de concevoir des produits plus efficaces sur le plan énergétique et de repousser les limites de la science thermique.

### **B. Analyse et investigation thermique**

L'analyse et l'investigation thermique sont des aspects essentiels de notre entreprise spécialisée dans les études de transfert thermique. Nous mettons en œuvre des méthodes avancées pour analyser et comprendre les aspects thermiques des systèmes et des équipements.

Notre processus d'analyse thermique commence par une évaluation approfondie des exigences spécifiques de nos clients. Nous travaillons en étroite collaboration avec eux pour comprendre leurs besoins, leurs objectifs et les performances attendues de leurs systèmes thermiques. Notre équipe utilise des outils avancés de modélisation et de simulation pour



évaluer les performances thermiques, identifier les points faibles et proposer des solutions d'amélioration.

### **C. Conception et optimisation**

La conception et l'optimisation sont des aspects essentiels de notre entreprise spécialisée dans les études de transfert thermique. Nous mettons en œuvre des approches avancées pour concevoir et optimiser les systèmes thermiques afin d'améliorer leur efficacité, leur fiabilité et leurs performances globales.

Notre équipe d'experts travaille en étroite collaboration avec nos clients pour comprendre leurs besoins et leurs objectifs spécifiques en matière de transfert thermique. En nous appuyant sur notre expertise et notre expérience, nous concevons des systèmes thermiques sur mesure qui répondent aux exigences particulières de chaque projet.

### **D. Formation et support technique**

La formation et le support technique sont des éléments clés de notre entreprise spécialisée dans les études de transfert thermique. Nous nous engageons à fournir à nos clients une assistance complète tout au long de leur parcours, en leur offrant des formations spécialisées et un support technique de haute qualité.

### **E. Laboratoire spécialisé**

Notre entreprise dispose d'un laboratoire spécialisé entièrement dédié aux études de transfert thermique. Ce laboratoire est équipé d'instruments de pointe et de technologies avancées pour mener des tests, des mesures et des analyses précises dans le domaine du transfert thermique.

Le laboratoire est conçu pour répondre aux besoins spécifiques de nos clients, qu'il s'agisse d'industries, d'écoles, d'instituts de recherche ou d'autres acteurs du secteur. Il est aménagé de manière à garantir un environnement contrôlé et sûr pour mener nos activités de manière optimale.

Nos instruments de test sont développés en interne pour répondre aux exigences spécifiques de chaque projet. Nous avons investi dans des équipements de pointe tels que des capteurs de température précis, des systèmes de mesure de flux de chaleur, des caméras

thermiques, des appareils de mesure de conductivité thermique, des dispositifs de mesure de résistance thermique, des thermocouples, des enregistreurs de données et bien d'autres.

Ces instruments nous permettent de mesurer avec précision les grandeurs thermiques pertinentes pour évaluer les performances thermiques des systèmes et des équipements. Nous pouvons mesurer la température, le flux de chaleur, la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la résistance thermique, la capacité thermique, la convection thermique et d'autres paramètres importants.

Notre laboratoire est également équipé de bancs d'essai spécialisés, conçus pour simuler des conditions réelles et reproduire des scénarios de transfert thermique. Ces bancs d'essai sont adaptés aux besoins spécifiques de chaque projet et nous permettent d'effectuer des tests réels dans des conditions proches de la réalité.

Nous attachons une grande importance à la précision, à la fiabilité et à la qualité des mesures effectuées dans notre laboratoire. Nous calibrons régulièrement nos instruments et nous nous assurons que nos méthodes de mesure respectent les normes et les bonnes pratiques du domaine.

## **II. BUSINESS MODEL CANVAS (BMC)**

Maintenant, passons au Business Model Canvas (BMC), qui est un outil puissant pour décrire la structure de notre modèle économique. Voici les principaux éléments du BMC appliqués à notre startup de bureau d'études dans le transfert thermique.

### **A. Segment de clientèle**

Notre entreprise cible principalement les industries, les écoles, les chercheurs et d'autres acteurs qui ont besoin d'études de transfert thermique pour leurs projets. Nous cherchons à fournir nos services à des clients en Algérie et éventuellement à l'étranger.

### **B. Proposition de valeur**

Notre entreprise propose des études de transfert thermique complètes et précises en utilisant notre laboratoire équipé de nombreux instruments de test développés par nos soins. Nous offrons des services de mesure de toutes les grandeurs thermiques nécessaires et

fournissons une documentation complète des résultats obtenus. De plus, nous proposons également des formations sur les bancs d'essai que nous avons créés.

### **C. Canaux de distribution**

Nous utiliserons une combinaison de canaux pour distribuer nos services. Cela inclut la promotion de notre entreprise par le biais de plateformes en ligne, de réseaux professionnels et de partenariats avec des institutions et des entreprises du secteur industriel. Nous utilisons principalement des canaux de distribution directs pour entrer en contact avec nos clients. Cela peut se faire par le biais de réseaux professionnels, de salons et conférences spécialisés, de recommandations et de notre présence en ligne grâce à un site web attrayant et informatif.

### **D. Relations clients**

Nous valorisons une relation étroite avec nos clients. Nous travaillons en étroite collaboration avec eux pour comprendre leurs besoins spécifiques, leurs défis et leurs objectifs. Nous fournissons un support continu tout au long de notre collaboration, en répondant à leurs questions, en les guidant dans leurs décisions et en leur fournissant des solutions personnalisées. Notre laboratoire spécialisé renforce cette relation en offrant un espace de collaboration et des possibilités d'expérimentation.

### **E. Sources de revenus**

Revenus proviennent principalement des services que nous proposons. Cela inclut les contrats de recherche et développement, les projets d'analyse et d'investigation thermique, les missions de conception et d'optimisation, ainsi que les formations spécialisées. Nous générons également des revenus supplémentaires grâce à l'utilisation de notre laboratoire spécialisé et à la mise à disposition d'équipements pour des projets spécifiques. Nous proposons des bancs d'essai spécialisés développés en interne pour simuler des conditions réelles de transfert thermique. Ces bancs d'essai peuvent être adaptés aux besoins spécifiques de nos clients et constituent un outil essentiel pour les essais et les mesures thermiques. Nous générons des revenus en vendant Nous proposons des formations spécialisées sur le transfert thermique et l'utilisation des bancs d'essai. Ces formations permettent à nos clients d'acquérir les connaissances et les compétences nécessaires pour comprendre et utiliser les principes du transfert thermique dans leurs projets. Nous facturons des frais pour ces formations, qui sont adaptées aux besoins spécifiques de chaque client. Ces bancs d'essai, en offrant des solutions

personnalisées et en assurant la maintenance associée. Nous offrons des services de maintenance et de support technique pour les bancs d'essai que nous fournissons à nos clients. Ces services comprennent la maintenance préventive, les réparations, les mises à jour et le support technique continu. Nous générons des revenus grâce à ces services en facturant des frais pour les contrats de maintenance et les interventions techniques.

#### **F. Ressources clés**

Les ressources clés de notre entreprise comprennent notre laboratoire équipé d'instruments de test développés en interne, notre expertise dans le domaine du transfert thermique, notre équipe de professionnels qualifiés et nos partenariats potentiels avec des acteurs de l'industrie.

#### **G. Activités clés**

Nos activités clés consistent à réaliser des études de transfert thermique, à développer et à maintenir notre laboratoire et nos instruments de test, à fournir des formations sur les bancs d'essai et à assurer une veille technologique dans le domaine.

#### **H. Partenaires clés**

Nous cherchons à établir des partenariats clés avec d'autres acteurs de l'industrie, tels que des fabricants de matériaux thermiques, des fournisseurs d'équipements spécialisés et des instituts de recherche. Ces partenariats nous permettent d'accéder à des ressources supplémentaires, d'explorer de nouvelles technologies et d'élargir notre portée sur le marché.

#### **I. Structure de coûts**

Les coûts associés à notre entreprise comprennent le développement et la maintenance du laboratoire, l'acquisition d'instruments de test, les frais de personnel, la promotion et le marketing, ainsi que les coûts administratifs et logistiques.

### **III. ESTIMATION DE FINANCEMENT**

#### **A. Dépenses initiales**

- Équipements spécialisés (caméras thermiques, capteurs, logiciels) : 50 000 \$
  - Frais de Recherche et développement du logiciel spécialisé : 80 000 \$
  - Achat equipment's de laboratoire: 30 000 \$
  - Frais juridiques et administratifs: 10 000 \$
  - Aménagement du bureau et installation technique : 20 000 \$
  - Frais de marketing initial et création de site web : 15 000 \$
  - Autres dépenses initiales (assurances, licences, etc.) : 5 000 \$
- ❖ Total des dépenses initiales: 210 000 \$

#### **B. Dépenses recurrences mensuelles**

- Salaires des ingénieurs et techniciens : 40 000 \$
  - Frais de location du bureau et des laboratoires : 8 000 \$
  - Frais de communication et d'accès aux bases de données : 3 000 \$
  - Frais de marketing et promotion : 5 000 \$
  - Services professionnels (comptabilité, conseil juridique) : 3 000 \$
  - Autres dépenses récurrentes (fournitures de bureau, frais bancaires) : 2 000 \$
- ❖ Total des dépenses récurrentes mensuelles : 61 000 \$

#### **C. Marge de sécurité**

Nous prévoyons une marge de sécurité de 15% sur les dépenses récurrentes mensuelles pour faire face à d'éventuels retards de paiement des clients et fluctuations économiques.

- ❖ Marge de sécurité: 9 150 \$

#### **D. Total des besoins de financement**

En additionnant les dépenses initiales, les dépenses récurrentes mensuelles et la marge de sécurité sur une période de 12 mois, nos besoins de financement totalisent :

- Total des dépenses initiales: 210 000 \$
- Total des dépenses récurrentes annuelles : 720 000 \$
- Total de la marge de sécurité : 109 800 \$
- Total des besoins de financement : 1 039 800 \$

Nous prévoyons de rechercher des financements auprès d'investisseurs spécialisés dans le secteur des technologies et de l'énergie, ainsi que d'explorer des partenariats potentiels avec des entreprises complémentaires. De plus, nous établirons une stratégie de tarification compétitive pour nos services d'analyses et investigations thermiques afin de générer des revenus réguliers et de réduire notre dépendance au financement externe.

#### **IV. GESTION DES RISQUES**

Dans le cadre de notre startup, nous avons identifié plusieurs risques potentiels qui pourraient affecter nos opérations et notre croissance. Nous avons développé une stratégie de gestion des risques afin de minimiser leur impact sur notre entreprise. Voici les principaux risques identifiés et les mesures que nous avons prises pour les atténuer :

**Risques liés à la sécurité des données thermiques :** Étant donné que nous traitons des données sensibles liées aux analyses thermiques de nos clients, nous reconnaissons l'importance de la sécurité des données. Nous mettons en place des mesures strictes de protection des données, telles que le chiffrement des données, des politiques d'accès et d'autorisation strictes, et la sauvegarde régulière des données. Nous effectuons également des audits de sécurité réguliers pour identifier et corriger d'éventuelles vulnérabilités.

**Risques liés à la conformité réglementaire :** En tant que fournisseur de services d'analyses thermiques, nous devons nous conformer à certaines réglementations et normes de l'industrie. Nous effectuons une veille réglementaire constante pour nous assurer de respecter les exigences en matière de santé, de sécurité et d'environnement. Nous travaillons en étroite collaboration avec des experts juridiques et des organismes de réglementation pour nous assurer que nous respectons toutes les exigences applicables.

**Risques réglementaires :** Notre activité est soumise à des réglementations spécifiques, telles que les normes industrielles et les exigences en matière de protection des données. Pour faire face à ce risque, nous avons engagé des experts juridiques spécialisés pour nous aider à comprendre et à respecter ces réglementations. Nous nous tenons également informés des évolutions législatives pertinentes et nous adaptons nos politiques et procédures en conséquence.

Nous documentons tous les risques identifiés, les mesures d'atténuation correspondantes et les plans d'action associés dans un plan de gestion des risques. Nous effectuons régulièrement une évaluation des risques pour identifier de nouveaux risques potentiels et mettre à jour nos mesures d'atténuation en conséquence

## **Conclusion**

Notre startup de bureau d'études dans le transfert thermique offre une expertise de pointe pour résoudre les défis liés à la gestion efficace de la chaleur. Avec nos services complets de recherche et développement, d'analyse et d'investigation thermique, de conception et d'optimisation, de formation et de support technique, ainsi que notre laboratoire spécialisé, nous sommes parfaitement équipés pour aider nos clients à atteindre leurs objectifs en matière de transfert thermique. Notre modèle économique, basé sur des relations clients solides, une proposition de valeur unique et des sources de revenus diversifiées, nous positionne comme un partenaire de confiance dans le domaine du transfert thermique. Nous sommes déterminés à contribuer au succès et à la croissance de nos clients en leur fournissant des solutions sur mesure, des conseils techniques de haute qualité et un environnement collaboratif pour la mise en œuvre de leurs idées.

# Business Model Canvas - BMC

Porteurs de projet :

- 1-Koudri Karim
- 2- Haddou Seddik

Promoteurs :

- P-Mme Bennia Imene
- CO-P- Amri Redha

Code de projet :

05\_15\_3172

## Projet Startup : Analyses et investigations thermiques.

Partenaires clés :	Activités Clés :	Propositions de valeur : 02	Relation Client :04	Clients :01
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Laboratoires, l'instituts de recherches et les universités.</li> <li>-Fournisseurs de matériaux et d'équipements thermiques.</li> <li>-Distributeurs de matériaux isolants.</li> <li>-Fabricants de matériaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Recherche et développement.</li> <li>-Analyse et investigation thermique.</li> <li>-Conception et optimisation.</li> <li>-Formation et support technique.</li> <li>-expérimentations dans le laboratoire spécialisé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Réduction des coûts énergétiques.</li> <li>-Expertise approfondie en transfert thermique</li> <li>-résolution de problèmes complexes, solutions personnalisées.</li> <li>- support technique et laboratoire spécialisé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Support technique et conseil.</li> <li>-Formation et ateliers.</li> <li>-Relation étroite.</li> <li>- collaboration.</li> <li>-confidentialité et sécurité des projets.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Entreprises du secteur de l'électronique, de l'électroménager, de l'automobile, de l'aérospatiale, etc.,</li> <li>-Industrie du bâtiment et de la construction.</li> <li>-Fabricants de matériaux isolants.</li> <li>- instituts de recherche et des</li> </ul>
	<b>Ressources clés :</b>		<b>Canaux :03</b>	



<b>thermiques.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Équipe d'experts et d'ingénieurs spécialisés</li> <li>- outils de modélisation et de simulation avancés.</li> <li>-Equipements de laboratoire spécialisé.</li> <li>-logiciels de pointe.</li> <li>-Brevets et propriété intellectuelle.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Site web de l'entreprise.</li> <li>-Réseaux sociaux professionnels (LinkedIn, etc.)</li> <li>-Salons et conférences spécialisés.</li> <li>-recommandations.</li> <li>-présence en ligne.</li> </ul>	universités.
<b>Coûts :</b>		<b>Revenus :</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Salaires de l'équipe et charges sociales</li> <li>-Coûts de recherche et développement</li> <li>-Coûts d'équipements et de logiciels</li> <li>-Frais de marketing et de communication.</li> <li>-Frais de déplacement et de participation à des événements.</li> <li>-maintenance du laboratoire spécialisé.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Vente de solutions d'analyse et d'investigation thermique.</li> <li>-Prestations de conseil et d'expertise.</li> <li>-Formation spécialisés et utilisation du laboratoire spécialisé</li> <li>-Licences d'utilisation de logiciels et de modèles</li> <li>-Contrats de recherche et développement.</li> </ul>		

## REFERENCES

- [1] Technique de L'ingénieur (1999, Avril). Physique Energétique : ti201, Transfer Thermique :422141, 5<sup>e</sup> Edition
- [2] Pathankar. Modalisation Numérique du Transfert Thermique, Méthode de Volumes Finis, Universitaire (2002)
- [3] Hosseini, S. M. H (2010). Numerical Prediction of the Effective Thermal Conductivity of Open– and ClosedCell Foam Structures, Defect and Diffusion Forum, 297-301, pp. 1210-1217
- [4] Fiedler, T. Recent (2008, October). Advances in the Prediction of the Thermal Properties of Syntactic Metallic Hollow Sphere Structures, Adv. Eng. Mater, 4, pp. 1-30
- [5] /Lu, G.-Y., et al (2014): Thermal Properties of Closed-Cell Aluminum Foam with Circular Pores Thermal science, Vol. 18, No. 5, pp. 1619-1624
- [6] C. Wang, M. Mobdi, F. Kuwahara (2019, Aout). Simulation of heat transfer in a closed-cell porous media under local thermal non-equilibrium condition International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. 29 No. pp. 2478-2500
- [7] Deng, Z.L., Liu, X.D., Huang, Y.P., Zhang, C.B. and Chen, Y.P. (2017), “Heat conduction in porous media characterized by fractal geometry”, Energies, Vol. 10 No. 8, p. 1230
- [8] J. Rouquerol et al (1994), Recommendation for the Characterization of Pours Solids. Pure and Applied Chemistry, Vol. 66, No. 8, pp. 1739-1758
- [9] J, Francl et W, D, Kingery (1954). Thermal Conductivity: Excremental Investigation of Effect of Porosity on Thermal Conductivity, Journal of The Armorican Carrick Society, Vol. 37 No, 2
- [10] V, T, Pham & T, H, Fang. Mechanical. Thermal Characterizations of Nano Porous Two-dimensional Boron Nitride Membranes Scientific Reports (2022) 12:6306
- [11] Xiang Zhang, Minghao Zhang, Chenping Zhang, Tian Zhou, Xuncheng Wu & Xuezheng Yue Prediction and Numerical Study of Thermal Performance of Gradient Porous Structures Based on Voronoi Tessellation Design, Materials 2022, 15, 8046
- [12] Propriétés thermiques de différents produits solides non alimentaires (Holuman,1990 ; Singh et Heldman,2008 ; Bazinet et al,20011)
- [13] Texas Instruments. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. SNIS159H – AUGUST 1999–REVISED DECEMBER 2017: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [14] <https://www.theengineeringprojects.com>
- [15] Interface to MSC Nastran Preference Guide 2018 Volume 2: Thermal Analysis
- [16] <https://www.alldatasheet.com>