

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie mécanique

Caractérisation thermique de modules de  
refroidissement pour la photovoltaïque  
concentrée

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie mécanique

Louis-Michel Collin

Jury : Richard Arès  
Luc Fréchette  
Nicolas Galanis  
Hachimi Fellouah



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*ISBN: 978-0-494-96234-3*

*Our file Notre référence*

*ISBN: 978-0-494-96234-3*

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

# RÉSUMÉ

Pour rentabiliser la technologie des cellules solaires, une réduction du coût d'exploitation et de fabrication est nécessaire. L'utilisation de matériaux photovoltaïques a un impact appréciable sur le prix final par quantité d'énergie produite. Une technologie en développement consiste à concentrer la lumière sur les cellules solaires afin de réduire cette quantité de matériaux. Or, concentrer la lumière augmente la température de la cellule et diminue ainsi son efficacité. Il faut donc assurer à la cellule un refroidissement efficace.

La charge thermique à évacuer de la cellule passe au travers du récepteur, soit la composante soutenant physiquement la cellule. Le récepteur transmet le flux thermique de la cellule à un système de refroidissement. L'ensemble récepteur-système de refroidissement se nomme module de refroidissement.

Habituellement, la surface du récepteur est plus grande que celle de la cellule. La chaleur se propage donc latéralement dans le récepteur au fur et à mesure qu'elle traverse le récepteur. Une telle propagation de la chaleur fournit une plus grande surface effective, réduisant la résistance thermique apparente des interfaces thermiques et du système de refroidissement en aval vers le module de refroidissement.

Actuellement, aucune installation ni méthode ne semble exister afin de caractériser les performances thermiques des récepteurs. Ce projet traite d'une nouvelle technique de caractérisation pour définir la diffusion thermique du récepteur à l'intérieur d'un module de refroidissement. Des indices de performance sont issus de résistances thermiques mesurées expérimentalement sur les modules.

Une plateforme de caractérisation est réalisée afin de mesurer expérimentalement les critères de performance. Cette plateforme injecte un flux thermique contrôlé sur une zone localisée de la surface supérieure du récepteur. L'injection de chaleur remplace le flux thermique normalement fourni par la cellule. Un système de refroidissement est installé à la surface opposée du récepteur pour évacuer la chaleur injectée. Les résultats mettent également en évidence l'importance des interfaces thermiques et les avantages de diffuser la chaleur dans les couches métalliques avant de la conduire au travers des couches diélectriques du récepteur. Des récepteurs de multiples compositions ont été caractérisés, démontrant que les outils développés peuvent définir la capacité de diffusion thermique.

La répétabilité de la plateforme est évaluée par l'analyse de l'étendue des mesures répétées sur des échantillons sélectionnés. La plateforme démontre une précision et reproductibilité de  $\pm 0.14$  °C/W.

Ce travail fournit des outils pour la conception des récepteurs en proposant une mesure qui permet de comparer et d'évaluer l'impact thermique de ces récepteurs intégrés à un module de refroidissement.

**Mots-clés :** cellule solaire, photovoltaïque, transfert de chaleur, concentration, résistances thermiques, plateforme de caractérisation, refroidissement



# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les personnes suivantes pour leur précieuse aide dans ce projet :

- Mes directeurs de recherche, soit Richard Arès et Luc Fréchette, pour leurs judicieux conseils et pour m'avoir donné l'occasion de mettre en valeur mes travaux à maintes reprises.
- Mon collègue Osvaldo J. Arenas pour sa diligence, son esprit d'équipe et son sens critique lors de nos collaborations ou des révisions.
- Maxime Nicole pour son temps et ses conseils lors du développement des simulations numériques.
- Éric Breton pour l'aide pratique dans l'élaboration de la plateforme.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ÉTAT DE L'ART</b>	<b>5</b>
2.1	Analyse thermique des récepteurs . . . . .	5
2.1.1	Résistance thermique globale . . . . .	5
2.1.2	Modélisation . . . . .	6
2.1.3	Calcul des résistances thermiques . . . . .	6
2.1.4	Technologies de refroidissement pour CPV . . . . .	12
2.2	Types de caractérisation thermique . . . . .	15
2.2.1	Caractérisation théorique . . . . .	15
2.2.2	Caractérisation expérimentale par symétrie . . . . .	18
2.2.3	Caractérisation expérimentale par colonne d'injection . . . . .	19
2.2.4	Caractérisation expérimentale pour systèmes de refroidissement . . . . .	21
2.2.5	Caractérisation expérimentale pour puces électroniques . . . . .	22
<b>3</b>	<b>CARACTÉRISATION THERMIQUE</b>	<b>25</b>
3.1	Avant-propos . . . . .	25
3.2	Abstract . . . . .	27
3.3	Introduction . . . . .	27
3.4	Methodology . . . . .	31
3.4.1	Experimental Test Apparatus . . . . .	31
3.4.2	Heat Flux Measurement . . . . .	32
3.4.3	Characterization Procedures . . . . .	33
3.4.4	Figures of Merit . . . . .	35
3.5	Test Platform Design . . . . .	36
3.5.1	System Configuration . . . . .	36
3.5.2	Heat Injector . . . . .	37
3.5.3	Cooling Module and Control . . . . .	38
3.5.4	Numerical validation . . . . .	38
3.6	Experimental Accuracy and Reproducibility . . . . .	40
3.6.1	Uncertainty evaluation . . . . .	40
3.6.2	TIM Influence . . . . .	42
3.6.3	Reproducibility and accuracy tests . . . . .	43
3.7	Application to Receiver Testing . . . . .	44
3.8	Conclusion . . . . .	46
<b>4</b>	<b>CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>MÉTHODOLOGIE DE CARACTÉRISATION</b>	<b>53</b>
A.1	Contexte . . . . .	53
A.2	Approche générale . . . . .	54

A.2.1	Conditions aux limites . . . . .	54
A.2.2	Injecteur de flux thermique . . . . .	56
A.3	Méthode de mesure . . . . .	56
A.3.1	Résistance thermique globale . . . . .	56
A.3.2	Résistance thermique en série . . . . .	58
<b>B</b>	<b>CONCEPTION</b>	<b>61</b>
B.1	Critères de conception . . . . .	61
B.1.1	Aire d'injection . . . . .	61
B.1.2	Génération d'un flux thermique . . . . .	61
B.1.3	Colonne d'injection . . . . .	62
B.1.4	Système de support . . . . .	66
B.1.5	Colonne amovible . . . . .	67
B.2	Concept global . . . . .	67
B.3	Sous-ensembles . . . . .	67
B.3.1	Base . . . . .	67
B.3.2	Système de support . . . . .	68
B.3.3	Trajet thermique . . . . .	68
B.3.4	Boîtier d'isolation . . . . .	70
B.3.5	Boîtier amovible . . . . .	70
<b>C</b>	<b>SIMULATIONS NUMÉRIQUES</b>	<b>73</b>
C.1	Modèle . . . . .	73
C.1.1	Hypothèses . . . . .	73
C.1.2	Géométrie . . . . .	73
C.1.3	Propriété des matériaux . . . . .	73
C.1.4	Conditions aux limites . . . . .	75
C.2	Résultats . . . . .	75
C.2.1	Gradients de température . . . . .	75
C.2.2	Mesure du flux thermique et de ses pertes . . . . .	77
C.3	Étude de sensibilité . . . . .	80
C.3.1	Caractérisation globale . . . . .	81
C.3.2	Caractérisation série . . . . .	81
<b>D</b>	<b>Composantes de la plateforme</b>	<b>87</b>
D.1	Colonne d'injection . . . . .	87
D.2	Isolant . . . . .	87
D.3	Élément chauffant . . . . .	89
D.4	Colonne mobile . . . . .	89
D.5	Matériaux d'interface thermique . . . . .	90
D.6	Structure de soutien . . . . .	90
D.7	Système de refroidissement . . . . .	91
D.8	Acquisition et analyse de données . . . . .	92
D.8.1	Capteurs de température . . . . .	92
D.8.2	Système d'acquisition de données . . . . .	94

TABLE DES MATIÈRES	vii
D.8.3 Logiciel d'acquisition de données . . . . .	94
D.9 Composantes diverses . . . . .	94
<b>E Programmation</b>	<b>97</b>
E.1 Lecture et présentation des températures . . . . .	97
E.2 Détection du régime établi . . . . .	98
E.3 Analyse des données . . . . .	99
E.4 Équation d'injection du flux thermique . . . . .	101
<b>F Mises en plan et fiches techniques</b>	<b>103</b>
F.1 Mises en plan . . . . .	103
F.2 Fiches techniques . . . . . <b>Pages retirées</b>	109
<b>G Données brutes</b>	<b>121</b>
<b>H Calcul des incertitudes</b>	<b>127</b>
H.1 Méthodologie . . . . .	127
H.2 Incertitudes . . . . .	128
<b>I Guide d'utilisation</b>	<b>129</b>
I.1 Mises en garde . . . . .	129
I.2 Branchements . . . . .	129
I.3 Programme - interface utilisateur . . . . .	131
I.4 Caractérisation globale . . . . .	132
I.5 Caractérisation en série . . . . .	137
<b>J Documents relatifs au mémoire par article</b>	<b>143</b>
<b>LISTE DES RÉFÉRENCES</b>	<b>147</b>



# LISTE DES FIGURES

1.1	Meilleures efficacités des cellules en recherche . . . . .	2
1.2	Schématisation d'une installation en photovoltaïque concentré . . . . .	2
1.3	Température de surface d'une cellule selon la concentration solaire . . . . .	3
1.4	Schématisation du récepteur . . . . .	3
2.1	Température et puissance d'une cellule selon l'illuminations et la résistance	7
2.2	Schéma de la cellule et du module sous-jacent . . . . .	7
2.3	Exemples de refroidissement actif . . . . .	14
2.4	Exemples de refroidissement passif . . . . .	15
2.5	Structure de refroidissement d'une puce électronique . . . . .	16
2.6	Résistance de diffusion thermique adimensionnelle pour récepteur . . . . .	17
2.7	Montage expérimental de la caractérisation thermique d'un polymère . . . . .	19
2.8	Montage expérimental de la caractérisation par colonne d'injection . . . . .	21
3.1	Schematic of a typical CPV module using lens. . . . .	28
3.2	Schematic of the thermal characterization platform, illustrating the heat flux and temperature measurement locations. . . . .	31
3.3	Resistance measurements for global characterization . . . . .	34
3.4	Resistance measurements for series characterization . . . . .	35
3.5	3D model of the core components in the characterization platform. . . . .	36
3.6	Thermal characterization platform with instrumentation. . . . .	37
3.7	Thermal simulation of the heat injector with a receiver being tested . . . . .	39
3.8	Temperature along the injection column . . . . .	41
3.9	Water temperature variations during a characterization run . . . . .	42
3.10	Transient thermocouple measurements until steady-state condition is achieved. . . . .	42
3.11	Global thermal resistance for different weight on the TIM . . . . .	43
3.12	Thermal resistance of cooling modules, $R_{m,g}$ , for global characterization . . . . .	45
3.13	Receiver thermal resistance, $\Delta R_r$ , for global and series characterizations. . . . .	45
3.14	Global module thermal resistance, $R_{m,g}$ , as a function of the figure of merit	46
A.1	Caractérisation de la résistance thermique en série du récepteur . . . . .	55
A.2	Caractérisation de la résistance thermique globale du récepteur . . . . .	55
A.3	Schéma de l'injecteur de chaleur avec parcours du flux thermique . . . . .	56
A.4	Flux injecté pour caractérisation globale avec récepteur . . . . .	58
A.5	Flux injecté pour caractérisation série avec récepteur . . . . .	60
B.1	Simulation d'une injection de chaleur en variant l'angle de transition . . . . .	64
B.2	Concept global de la plateforme de caractérisation . . . . .	68
B.3	Concept de la base du montage . . . . .	69
B.4	Concept du système de support . . . . .	69
B.5	Concept des composantes servant au chemin thermique principal . . . . .	70

B.6	Concept du boîtier . . . . .	71
B.7	Concept de la section amovible du montage . . . . .	71
C.1	Modèle de la simulation de l'injecteur . . . . .	74
C.2	Simulation de la température de l'injecteur pour la caractérisation globale .	76
C.3	Simulation du flux thermique de l'injecteur pour la caractérisation globale	78
C.4	Comparaison du flux thermique sur une simulation . . . . .	79
C.5	Modèle pour l'étude de sensibilité de l'injecteur (globale) . . . . .	82
C.6	Résistances pour l'étude de sensibilité de l'injecteur (globale) . . . . .	82
C.7	Modèle pour l'étude de sensibilité de l'injecteur (en série) . . . . .	83
C.8	Résistances pour l'étude de sensibilité de l'injecteur (en série) . . . . .	84
D.1	Plateforme de caractérisation thermique . . . . .	88
D.2	Colonne d'injection de chaleur . . . . .	88
D.3	Corrélation de la conductivité thermique du cuivre . . . . .	88
D.4	Isolant Pyrogel® XT d'Aspen Aerogels® . . . . .	89
D.5	Élément chauffant de Watlow® . . . . .	90
D.6	Module de la colonne secondaire pour la caractérisation en série . . . . .	90
D.7	Matériau d'interface thermique Tpli <sup>TM</sup> 210 . . . . .	91
D.8	Structure de support en acier inoxydable. . . . .	91
D.9	Plaque de refroidissement Ascent CP25 <sup>TM</sup> de Lytron® . . . . .	92
D.10	Système de circulation d'eau utilisé pour la condition de refroidissement. .	93
D.11	Capteurs pour la mesure de l'écoulement . . . . .	93
D.12	Glissière pour injecteur . . . . .	95
D.13	Base de la plate-forme avec son système d'inclinaison . . . . .	95
E.1	Architecture de programmation . . . . .	97
E.2	Sous-programme de la lecture des mesures de température . . . . .	98
E.3	Sous-programme destiné à la vérification du régime établi . . . . .	99
E.4	Sous-programme permettant le calcul de la résistance thermique . . . . .	100
G.1	Données brutes des caractérisations en série des plaques . . . . .	122
G.2	Données brutes des caractérisations globales des plaques . . . . .	123
G.3	Données brutes des caractérisations en série des récepteurs . . . . .	124
G.4	Données brutes des caractérisations globales des récepteurs . . . . .	125
I.1	Branchement de l'élément chauffant . . . . .	130
I.2	Circuit emprunté par le fluide de refroidissement . . . . .	130
I.3	Interface de l'utilisateur . . . . .	132
I.4	Activation du système d'acquisition de données . . . . .	133
I.5	Activation du programme d'acquisition de données . . . . .	134
I.6	Activation du thermorégulateur . . . . .	134
I.7	Activation du refroidisseur . . . . .	134
I.8	Installation du récepteur pour caractérisation globale . . . . .	135
I.9	Masse à ajouter sur l'injecteur . . . . .	136
I.10	Activation de la colonne d'injection . . . . .	136

I.11	Acquisition de la résistance thermique de l'échantillon . . . . .	137
I.12	Activation du système d'acquisition de données . . . . .	138
I.13	Activation du programme d'acquisition de données . . . . .	138
I.14	Activation du thermorégulateur . . . . .	138
I.15	Activation du refroidisseur . . . . .	139
I.16	Installation du récepteur pour caractérisation série . . . . .	140
I.17	Masse à ajouter sur l'injecteur . . . . .	140
I.18	Activation de la colonne d'injection . . . . .	141
I.19	Acquisition de la résistance thermique de l'échantillon . . . . .	141



# LISTE DES TABLEAUX

2.1	Paramètres pour l'estimation des résistances thermiques . . . . .	8
2.2	Estimation des résistances thermiques d'un module de refroidissement . . .	13
3.1	Simulation conditions . . . . .	39
3.2	Heat injector performances from simulation . . . . .	40
3.3	Receivers structure composition . . . . .	44
A.1	Critères de conception de la plateforme de caractérisation . . . . .	54
B.1	Température de la colonne d'injection selon l'épaisseur de la section supérieure	63
B.2	Différences de températures dans les sections de la colonne d'injection . . .	66
C.1	Conductivité thermique des matériaux . . . . .	74
C.2	Conditions limites de simulation . . . . .	75
C.3	Distribution de la température de la simulation de l'injecteur . . . . .	76
C.4	Flux thermique calculé par intégration de surface dans la simulation de l'injecteur . . . . .	78
C.5	Paramètres pour la comparaison des méthodes de mesure du flux thermique par simulation . . . . .	80
C.6	Flux traversant la colonne d'injection selon les résistances thermiques pour caractérisation globale . . . . .	83
C.7	Flux traversant la colonne d'injection selon les résistances thermiques pour caractérisation en série . . . . .	85



# LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
$a$	Position sur la colonne d'injection (différente de $b$ )
$A$	Aire de section de la colonne
$A_{rec}$	Surface du récepteur exposée à l'air
$A_{ref}$	Aire nécessaire pour le refroidissement de la cellule par convection
$A_s$	Aire de la cellule
$b$	Position sur la colonne d'injection (différente de $a$ )
$Bi$	Nombre de Biot
$c$	Concentration solaire
$C_p$	Coefficient de chaleur spécifique
$e$	Efficacité de la cellule
$E$	Étendue de l'incertitude totale
$Err_{rate}$	Erreur relative sur la mesure de la résistance thermique
$F$	Flux d'énergie solaire
$h$	Coefficient de convection
$h_{conv\ cell}$	Coefficient de convection naturelle sur la cellule
$h_{ray}$	Coefficient de rayonnement
$h_{rec}$	Coefficient de convection à la surface du récepteur
$h_{ref\ conv}$	Coefficient de conduction naturelle du système de refroidissement
$I_t$	Incertaince totale
$k$	Conductivité thermique du récepteur
$K_c$	Primitive de la conductivité thermique de la colonne d'injection
$k_c$	Conductivité thermique de la colonne d'injection
$k_{cell}$	Conductivité thermique de la cellule
$k_{TIM}$	Conductivité thermique des TIMs
$l_{0-b}$	Distance entre le point virtuel $x_0$ et le point $b$
$l_{a-b}$	Distance entre les points $a$ et $b$ sur la colonne
$l_{a-ext}$	Distance entre le point $a$ et l'extrémité de la colonne
$m$	Masse de la partie active de la colonne d'injection
$N$	Nombre de thermocouples
$n_m$	Nombre de mesure de température
$Q$	Taux de chaleur
$\dot{Q}$	Flux thermique injecté
$\dot{Q}_0$	Estimation initiale du flux thermique injecté
$R$	Résistance thermique d'un échantillon

Symbole	Définition
$R_c$	Résistance à vide
$R_{c,g}$	Résistance globale à vide
$R_{c,s}$	Résistance série à vide
$R_{cell}$	Résistance thermique de la cellule
$R_{conv\ cell}$	Résistance thermique en convection entre cellule et air ambiant
$R_i$	Impact résistif du récepteur
$R_{inf}$	Résistance nominale, diminuée de l'incertitude
$R_g$	Résistance thermique globale
$R_m$	Résistance avec échantillon
$R_{m,g}$	Résistance globale avec échantillon
$R_{m,s}$	Résistance série avec échantillon
$R_{max}$	Résistance thermique maximale admissible pour la cellule
$R_n$	Résistance nominale d'un récepteur avec résistances de plateforme
$R_r$	Résistance thermique du module de refroidissement
$R_r\ conv$	Résistance de la convection naturelle entre le récepteur et l'air
$R_{ray\ cell}$	Résistance thermique en rayonnement entre cellule et air ambiant
$R_{rec\ 1}$	Résistance en conduction du récepteur via le système de refroidissement
$R_{rec\ 2}$	Résistance de diffusion du récepteur via le système de refroidissement
$R_{rec\ cond}$	Résistance en conduction du récepteur via sa surface supérieure
$R_{rec\ TIM}$	Résistance du TIM entre le récepteur et le système de refroidissement
$R_{rec\ conv}$	Résistance de convection de la face supérieure du récepteur
$R_{ref}$	Résistance interne du système de refroidissement
$R_{ref\ conv}$	Résistance de convection entre système de refroidissement et environnement
$R_s$	Résistance thermique série
$R_{sup}$	Résistance nominale, augmentée de l'incertitude
$R_{TIM}$	Résistance du TIM entre le récepteur et le système de refroidissement
$R_{TIM\ cell}$	Résistance thermique du TIM entre la cellule et le récepteur
$S$	Figure de mérite en diffusion
$t$	Épaisseur du récepteur
$T$	Température
$T_0$	Température à une position virtuelle sur la colonne
$T_1$ à $T_5$	Température des thermocouples 1 à 5
$T_a$	Température a un point $a$ sur la colonne
$T_{air}$	Température de l'air ambiant
$T_b$	Température a un point $b$ sur la colonne
$T_{calc\_1}$ à $T_{calc\_5}$	Température calculée des thermocouples
$t_{cell}$	Épaisseur de la cellule
$T_{ext}$	Température à l'extrémité de la colonne
$T_{m\_1}$ à $T_{m\_5}$	Températures mesurées des thermocouples
$T_{max}$	Température maximale de la cellule
$T_{sky}$	Température de rayonnement des surfaces environnantes
$t_{TIM}$	Épaisseur des TIMs

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>
$T_{tip}$	Température extrapolée de l'extrémité de la colonne
$T_{water}$	Température moyenne de l'eau
$T_{\infty}$	Température du fluide de refroidissement ou de l'air ambiant
$x$	Distance entre l'extrémité de la colonne et un point donné
$x_0$	Position virtuelle sur la colonne
$\alpha, \beta, \gamma$	Coefficients de la primitive de la conductivité
$\Delta R_{r,g}$	Résistance thermique globale du module
$\Delta R_{r,s}$	Résistance thermique série du module
$\Delta T$	Différence de température entre les parois d'un échantillon (test "sandwich")
$\Delta T_{out}$	Variation de température sur l'écoulement sortant (eau)
$\Delta T_{in-out}$	Variation de température entre l'écoulement entrant et sortant
$\varepsilon$	Émissivité
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann



# LISTE DES ACRONYMES

<b>Acronyme</b>	<b>Définition</b>
CPV	<i>Concentrated Photovoltaics</i> (Photovoltaïque concentré)
TIM	<i>Thermal Interface Material</i> (Matériau d'interface thermique)
CAO	Conception assistée par ordinateur



# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

Dû à la raréfaction des combustibles fossiles, de nouvelles sources d'énergies sont étudiées pour la production d'électricité. L'énergie solaire est une alternative durable par rapport à ces combustibles. La cellule photovoltaïque est l'une des technologies les plus efficaces pour réaliser la conversion du rayonnement solaire en électricité. Or, afin de devenir une alternative énergétique concurrentielle, l'énergie solaire photovoltaïque doit notamment réduire ses coûts relatifs à la production d'électricité [41].

Plusieurs technologies photovoltaïques existent actuellement tels que les cellules à base de silicium, les cellules organiques et les cellules à multijonctions. Ces dernières possèdent présentement le record mondial de conversion photovoltaïque établi à 43.5 %, tel que présenté à la figure 1.1 du National Renewable Energy Laboratory (NREL). Cependant, elles sont relativement dispendieuses et ont un impact considérable sur le coût global de l'électricité produite [30].

Pour diminuer l'impact du coût élevé des cellules à multijonctions, on utilise des miroirs et/ou des lentilles de convergence pour que la lumière d'une grande surface illuminée soit concentrée sur la cellule. La figure 1.2 représente une schématisation de cette technologie, appelée photovoltaïque concentré (CPV). Ainsi, augmenter la concentration solaire par cellule photovoltaïque réduit le nombre de cellules nécessaires pour obtenir une production d'électricité prédéfinie. Certains chercheurs et fabricants ont réalisé des installations photovoltaïques d'une concentration avoisinant 500X [7] [32], mais d'autres concentrent leur efforts sur des systèmes destinés à 1000X et même plus [37].

Cependant, selon Dalal [12], l'efficacité de la cellule décroît avec l'augmentation de sa température. Or, la cellule ne convertissant qu'une partie de l'énergie solaire, l'énergie restante est convertie en chaleur, ce qui peut représenter plus de 50 % de l'énergie incidente. Pour conserver l'efficacité de la cellule, il faut donc limiter sa hausse de température provoquée par la lumière concentrée. Une corrélation est présentée à la figure 1.3 entre la température et la concentration solaire fournie à une cellule sans système de refroidissement. Soumise à une concentration de 500 soleils (1 soleil équivaut approximativement à  $1000 \text{ W/m}^2$  [30]), elle peut théoriquement voir sa température monter à  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$  lorsqu'uniquement refroidie par convection naturelle et rayonnement [7].

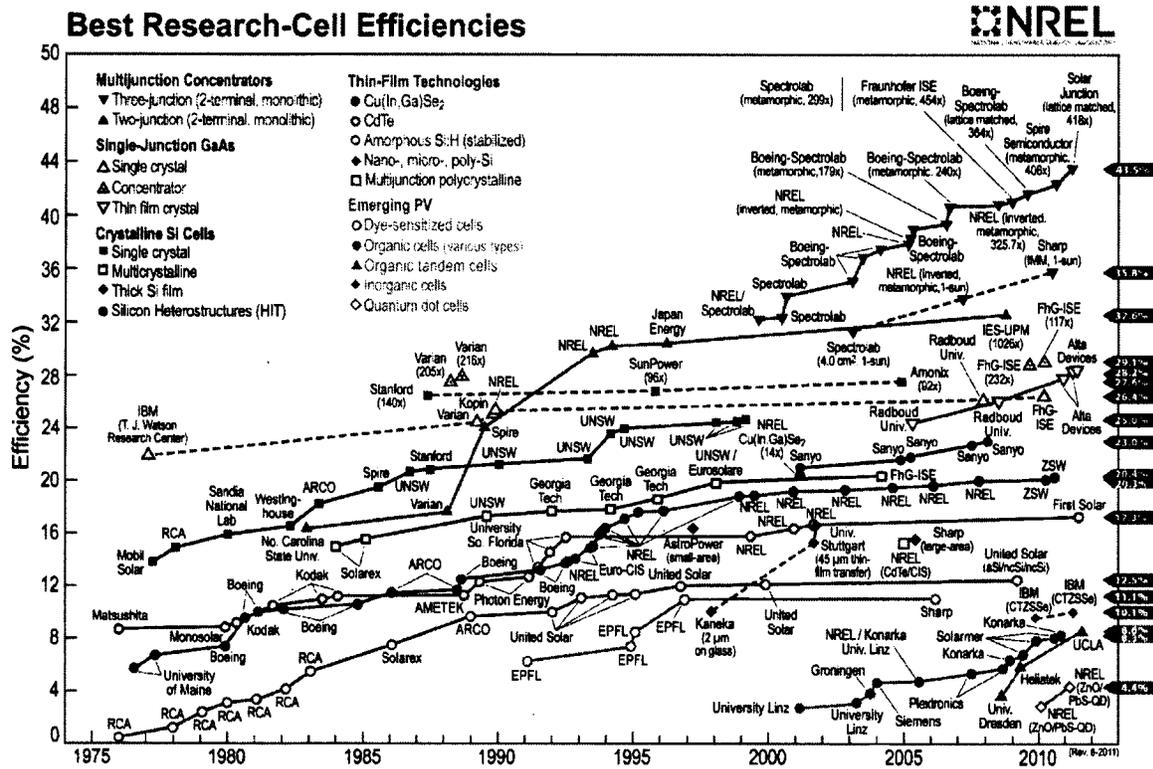


Figure 1.1 Meilleures cellules solaires en efficacité selon l'année en recherche [26]

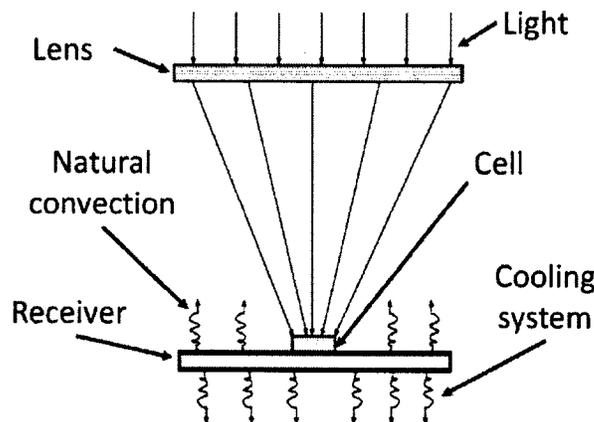


Figure 1.2 Schématisation d'une installation en photovoltaïque concentré [11]\*Image modifiée de la version originale

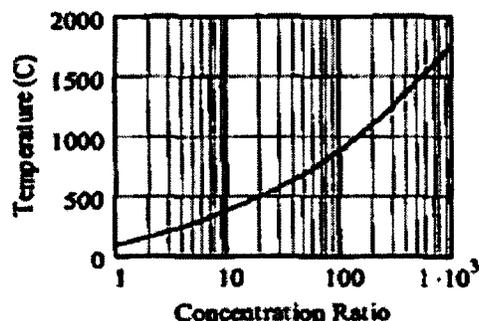


Figure 1.3 Température de surface d'une cellule solaire en fonction de la concentration solaire. La cellule est soumise uniquement à la convection naturelle et à la radiation avec le milieu ambiant. [30]

La structure sous-jacente à la cellule, mentionnée ici comme étant le module de refroidissement, a un impact majeur sur la dissipation de la chaleur produite par la cellule [7] [5] et est le sujet de plusieurs travaux de recherche [30]. L'une des composantes de ces structures supporte directement la cellule (le récepteur) et est schématisée à la figure 1.4 (a). Une seconde composante est le système de refroidissement, situé sous le récepteur et prenant la forme d'ailettes, de microcanaux, de thermosiphons, etc. Des interfaces thermiques, soit dans les modules ou à la jonction entre le module et la cellule complètent la liste des éléments thermiquement actifs dans une unité CPV conventionnelle.

Le flux de chaleur, partant de la cellule, passe au travers du récepteur et se diffuse latéralement avant que le système de refroidissement ne l'évacue par conduction et/ou par convection pour être ultimement transféré à l'environnement ou à un fluide de refroidissement. Une schématisation du flux thermique dans un module de refroidissement quelconque est illustrée à la figure 1.4 (b).

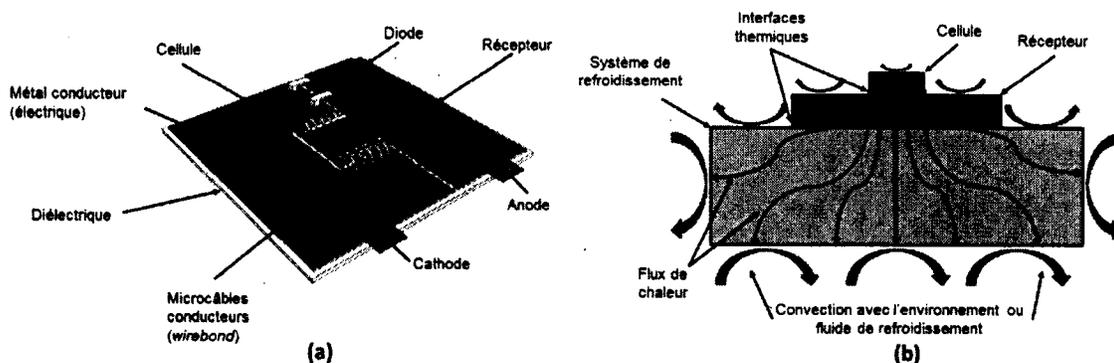


Figure 1.4 Schématisation du récepteur illustrant la cellule et les composantes électriques (a) ainsi qu'une vue en coupe de la distribution de la chaleur d'un récepteur (b) *Source (Image (a)) : Osvaldo J. Arenas*

Selon la revue de littérature réalisée pour ce travail, il ne semble présentement pas exister de méthode ni d'installation permettant la mesure standardisée des performances thermiques des modules de refroidissement. Par conséquent, la comparaison des performances des modules est difficile, voire impossible, étant donné la différence des méthodes employées pour les caractériser. Il est donc pertinent de développer une méthodologie et une plateforme de caractérisation permettant l'évaluation standardisée de ces modules, indépendante de leur configuration interne. Le développement de cette méthode est le sujet de ce projet de recherche. Elle permet la comparaison et l'analyse des modules de refroidissement, fournissant une aide précieuse à leur conception ou à leur sélection dans une application en CPV.

Le chapitre 2 présente l'analyse thermique d'un module de refroidissement, suivi des travaux scientifiques pertinents au développement de la méthodologie et de l'appareillage de caractérisation. Au chapitre 3, un article soumis à la revue scientifique *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* décrit le fonctionnement et les performances d'une telle plateforme, faisant de ce mémoire, un mémoire par article. Le chapitre 4 présente la conclusion et les recommandations de ce travail. Plus de détails sur la méthodologie de caractérisation employée, la conception de la plateforme, l'analyse numérique de ses propriétés et le choix des composantes sont présentés aux annexes A, B, C et D, respectivement. La description du programme informatique est présentée à l'annexe E. Les mises en plan et fiches techniques reliées aux composantes sont présentées à l'annexe F. Les données brutes utilisées pour produire l'article sont répertoriées à l'annexe G. Quant aux méthodes de calcul d'erreurs, elles sont présentées à l'annexe H. Un guide de l'utilisateur de la plateforme est présenté à l'annexe I. Enfin, les documents relatifs à la soumission de l'article scientifique sont présentés à l'annexe J.

### **Contexte du projet**

Ce projet de recherche s'effectue sous la codirection des professeurs Richard Arès et Luc Fréchette, tous deux membres du Centre de Recherche en Nanofabrication et Nanocaractérisation (CNR<sup>2</sup>). Ce centre de recherche étant lui-même inclus dans l'Institut Interdisciplinaire d'Innovation Technologique (3IT). Une collaboration est réalisée avec Osvaldo Jesus Arenas, un étudiant au doctorat en génie électrique qui conçoit et fabrique des récepteurs à forte dissipation thermique nécessitant d'être caractérisés [8].

# CHAPITRE 2

## ÉTAT DE L'ART

Ce chapitre présente une revue de la littérature scientifique concernant une méthodologie de caractérisation expérimentale des récepteur pour CPV. Dans les limites de cette étude, aucun ouvrage ne semble traiter de ce sujet spécifiquement, ce qui confirme le caractère original du présent projet. Néanmoins, certains travaux scientifiques relatifs aux récepteurs et à des méthodes ou installations de caractérisation thermique sont pertinents à ce projet. Dans ce chapitre, il sera d'abord question de l'analyse thermique des modules de refroidissement. De cette analyse, différentes stratégies de caractérisation thermiques seront évaluées. Enfin, les éléments pertinent à la caractérisation de récepteurs seront mis en évidence.

### 2.1 Analyse thermique des récepteurs

L'analyse thermique est réalisée sur l'ensemble du module de refroidissement, incluant la cellule, afin de déterminer le parcours complet du flux thermique. Un portrait général du réseau thermique d'un module typique est d'abord présenté avant d'effectuer l'étude détaillée des résistances de ses composantes. Ces résistances permettront l'élaboration des principaux chemins thermiques et de fournir des informations pertinentes au développement de la méthode de caractérisation.

#### 2.1.1 Résistance thermique globale

Présentée par Royne [30], la figure 2.1 (a) illustre la température d'une cellule typique en fonction de la concentration solaire. Les courbes correspondent à différentes résistances thermiques globales entre l'environnement et la cellule. On y remarque que la réduction de la résistance augmente substantiellement la concentration solaire si l'on conserve une température de cellule constante. À titre d'exemple, une cellule à 150 °C qui passerait d'une résistance de  $10^{-2} \frac{K \cdot m^2}{W}$  à  $10^{-3} \frac{K \cdot m^2}{W}$  verrait sa concentration solaire augmentée d'un facteur 10.

Royne a également déterminé une relation entre la puissance électrique produite par unité de surface d'une cellule et la résistance thermique de l'ensemble du module de refroidissement. La relation établie inclut le taux de conversion en électricité de la cellule, ainsi que

le taux de réduction de l'efficacité en fonction de la température. Cette relation, présentée à la figure 2.1 (b)<sup>1</sup>, démontre que pour une résistance donnée, il existe une valeur optimale de la concentration solaire et une concentration au-delà de laquelle la cellule ne produit plus d'électricité. Cette notion est utile pour connaître la concentration solaire optimale en fonction de la résistance du module de refroidissement et des propriétés de la cellule. Or, elle ne fournit pas d'informations sur le trajet emprunté par la chaleur dans la structure.

Connaître les principaux trajets thermiques dans le module de refroidissement est une étape préalable à l'établissement des critères de performance. À cette fin, une analyse du réseau de résistances par lequel passe le flux thermique est développée à la section suivante.

### 2.1.2 Modélisation

La représentation 2D du module de refroidissement, incluant la cellule, est illustrée à la figure 2.2 (a). On y remarque les principales zones de convection avec l'environnement ou un fluide de refroidissement, ainsi que les principales zones de rayonnement avec l'environnement. Cette figure illustre également les matériaux d'interfaces thermiques (TIM).

Une schématisation du réseau des résistances thermiques entre la cellule et l'environnement est représentée à la figure 2.2 (b). C'est un modèle simplifié et élaboré à partir de la représentation 2D de cette figure. Les variables reliées aux résistances seront définies au tableau 2.2 de la section 2.1.3.

Trois trajets d'évacuation de la chaleur sont identifiés, soit par la surface supérieure de la cellule, par la surface supérieure du récepteur et par l'interface entre le système de refroidissement et l'environnement. La prochaine sous-section traite de l'analyse des résistances pour ces trois trajets, permettant de définir lequel (ou lesquels) possède une influence majeure sur l'évacuation de la chaleur.

### 2.1.3 Calcul des résistances thermiques

L'estimation et l'analyse des résistances présentées à la figure 2.2 (b) sont détaillés dans cette sous-section. Ces calculs sont réalisés pour le cas d'une cellule sous une concentration solaire de 1000X. Les principaux paramètres utilisés pour réaliser ces calculs sont présentés au tableau 2.1 et les résistances présentées au tableau 2.2.

---

<sup>1</sup>Les résistances  $R = 10^{-5}$  et  $R = 10^{-6} \frac{K \cdot m^2}{W}$  semblent plutôt être respectivement  $R = 10^{-4}$  et  $R = 10^{-5} \frac{K \cdot m^2}{W}$

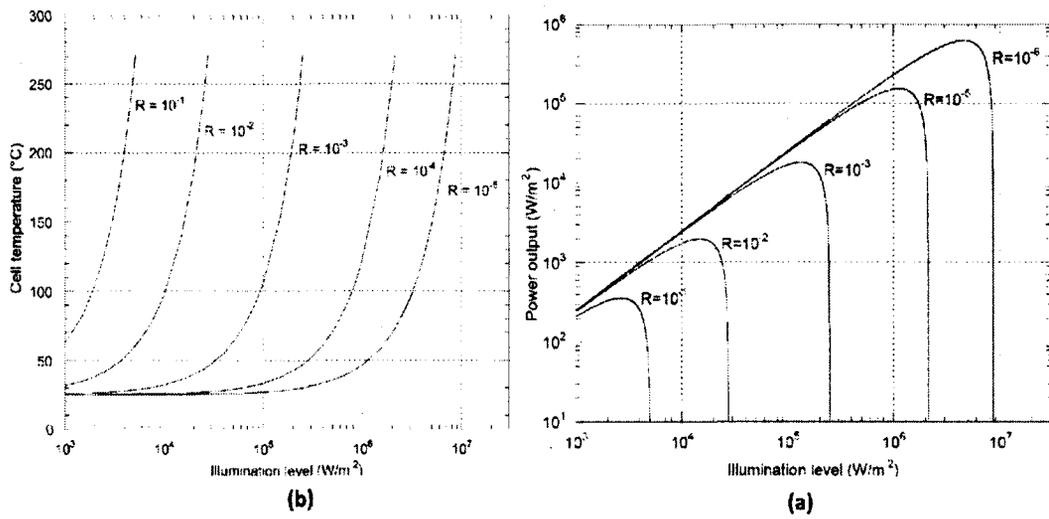


Figure 2.1 Température de la cellule en fonction de l'illumination (a) Puissance de sortie en fonction de l'illumination pour différentes résistances thermiques  $R$  ( $\frac{K \cdot m^2}{W}$ ) (b) [30]

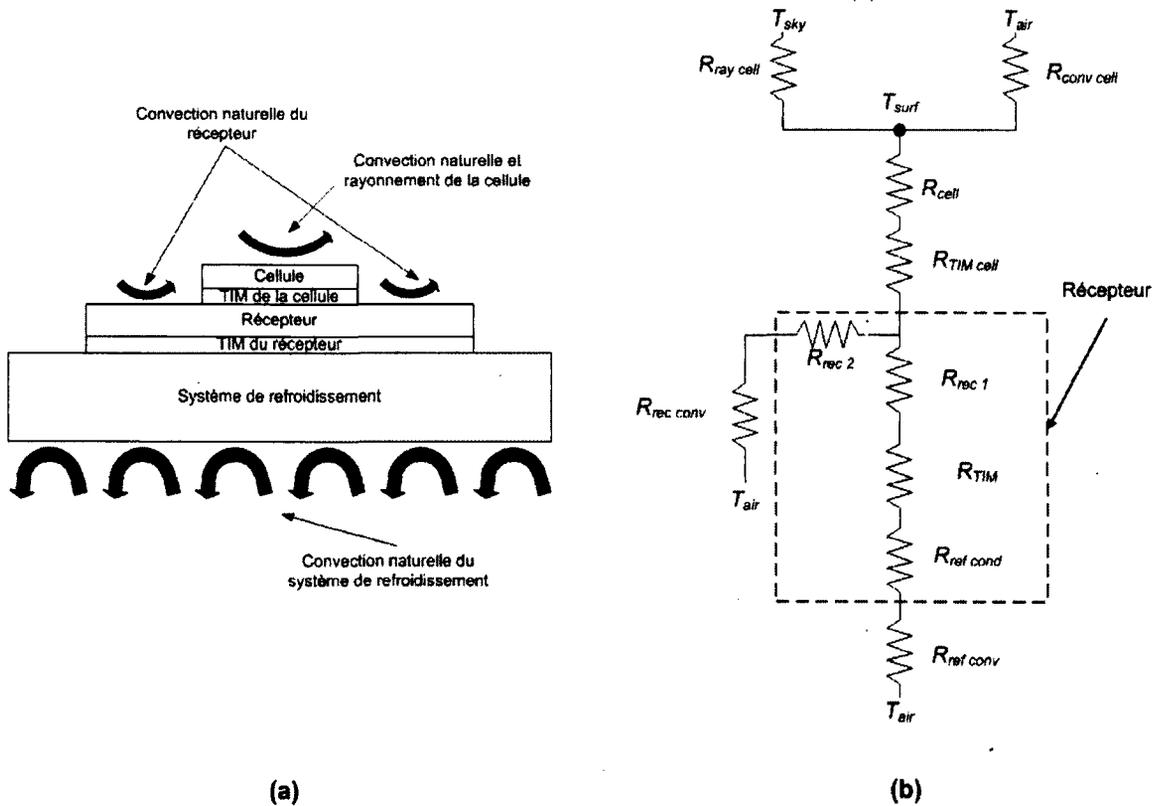


Figure 2.2 Schéma de la cellule et du module sous-jacent : Vue en coupe (a) Réseau des résistances thermiques simplifié (b)

Tableau 2.1 Paramètres pour l'estimation des résistances thermiques d'un module de refroidissement avec la cellule

Paramètre	Valeur	Unité
Aire de la cellule	1	cm <sup>2</sup>
Concentration solaire	1000	-
Efficacité de la cellule	0.35	-
Température de surface de la cellule	343	K
Température du ciel [34]	230	K
Température de l'air	298	K
Aire du récepteur	16	cm <sup>2</sup>
Épaisseur du TIM	25	μm
Conductivité du TIM [14]	0.735	$\frac{W}{m \cdot K}$
Conductivité @ 15 °C de la cellule (substrat en germanium) [3]	64	$\frac{W}{m \cdot K}$
Coefficient de convection du système de refroidissement [34]	15	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
Coefficient de convection du récepteur et de la cellule [34]	25	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$

### Résistance globale

En posant que la cellule est maintenue à une température maximale acceptable  $T_{max}$  de 70 °C, que son taux de conversion  $e$  est de 35 %, que la température ambiante  $T_{air}$  est de 25 °C, que le flux solaire  $F$  est de 1000  $\frac{W}{m^2}$  et que la concentration  $c$  est de 1000X, la résistance globale maximale admissible  $R_{max}$  est de :

$$\begin{aligned}
 R_{max} &= \frac{T_{max} - T_{air}}{c \cdot F \cdot (1 - e) \cdot A_s} \\
 &= \frac{70^\circ C - 25^\circ C}{1000 \cdot 1000 \frac{W}{m^2} \cdot (1 - 0.35) \cdot (0,01m)^2} = 0.69 \frac{K}{W}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Le réseau est composé de résistances en parallèle et en série. Définir le (ou les) trajet thermique principal permettrait d'orienter les efforts afin d'abaisser la résistance thermique globale. Le premier des trajets à être analysé est la surface de la cellule exposée à l'environnement.

### Résistances thermiques cellule-environnement $R_{conv\ cell}$ et $R_{ray\ cell}$

Le trajet thermique le plus direct entre la cellule et l'environnement est réalisé via la convection naturelle et le rayonnement sur sa surface supérieure. Il est estimé que le ciel a une température effective  $T_{sky}$  de 230 K lorsqu'il est froid et dégagé [34]. On suppose que la cellule est une plaque de germanium pur avec une émissivité  $\varepsilon$  de 0,09 [14]. En supposant une température  $T_{surf}$  à la surface de la cellule égale à la température maximale acceptable

$T_{max}$  et en utilisant la constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma$ , le coefficient  $h_{ray}$  et la résistance thermique  $R_{ray\ cell}$  du rayonnement de la cellule sont respectivement :

$$\begin{aligned} h_{ray} &= \varepsilon\sigma(T_{surf}^2 + T_{sky}^2)(T_{surf} + T_{sky}) \\ &= 0.09 * 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4} * ((343K)^2 + (298K)^2)(343K + 298K) \\ &= 0.68 \frac{W}{m^2 * K} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$R_{ray\ cell} = \frac{1}{h_{ray} * A_s} = \frac{1}{0.68 \frac{W}{m^2 * K} * (0.01m)^2} = 14\ 706 \frac{K}{W} \quad (2.3)$$

Pour le refroidissement par convection, en supposant un coefficient de convection naturelle  $h_{conv\ cell}$  de  $25 \frac{W}{m^2 * K}$ , représentant une très forte convection, pour une surface horizontale orientée vers le haut et une aire de cellule  $A_s$  de  $1\ cm^2$ , on obtient :

$$R_{conv\ cell} = \frac{1}{h_{conv\ cell} * A_s} = \frac{1}{25 \frac{W}{m^2 * K} * (0.01m)^2} = 40\ 000 \frac{K}{W} \quad (2.4)$$

Ces chemins sont insuffisants pour assurer le refroidissement de la cellule, car leur résistance thermique est largement supérieure à  $R_{max}$ . Dans ce contexte, le refroidissement par le dessous de la cellule est donc critique pour atteindre une résistance égale ou inférieure à  $R_{max}$ . Les premières résistances rencontrées sont la cellule et le TIM entre la cellule et le récepteur.

### Résistance thermique de la cellule $R_{cell}$

En posant comme hypothèse que le flux thermique provient de la surface supérieure de la cellule, sa pleine épaisseur  $t_{cell}$  de 0.16 mm doit être traversée par le flux thermique. On pose que la conductivité  $k_{cell}$  de la cellule est approximativement celle du germanium, soit de  $64 \frac{W}{m * K}$ . La résistance thermique de la cellule  $R_{cell}$  peut être calculée comme suit :

$$R_{cell} = \frac{t_{cell}}{k_{cell} * A_s} = \frac{0.00016m}{64 \frac{W}{m * K} * (0.01m)^2} = 0.025 \frac{K}{W} \quad (2.5)$$

Si l'on suppose une puissance de 45 W (soit une concentration d'environ 450X), la différence de température entre les deux côtés de la cellule devrait être de 1.125 °C selon la résistance déterminée à la section précédente. Cette valeur coïncide avec les mesures expérimentales d'Araki (500X) [7] et de Min (400X) [23] pour des conditions similaires,

car cette différence était de l'ordre de 1 °C. Cela confirme que la cellule est un élément mineur dans la mesure de la résistance et peut donc effectivement être retirée du modèle du module de refroidissement sans perturber les résultats.

### Résistance thermique du TIM de la cellule $R_{TIM\ cell}$ et du TIM du récepteur $R_{TIM}$

Après avoir traversé la cellule, le flux thermique traverse le TIM entre la cellule et le récepteur. Une pâte thermique conductrice d'une conductivité thermique  $k_{TIM}$  de  $0.735 \frac{W}{m \cdot K}$  a été posée comme TIM [38]. En supposant une épaisseur  $t_{TIM}$  de  $25 \mu m$  et un contact parfait entre le TIM et les surfaces, sa résistance est de :

$$R_{TIM\ cell} = \frac{t_{TIM}}{k_{TIM} * A_s} = \frac{25 * 10^{-6} m}{0.735 \frac{W}{m \cdot K} * (0.01 m)^2} = 0.34 \frac{K}{W} \quad (2.6)$$

La résistance thermique  $R_{max}$  liant la cellule à l'environnement implique que les résistances thermiques de contact ne peuvent pas être négligées. La résistance pour la pâte thermique considérée pour le TIM de la cellule est d'approximativement 50 % de la résistance thermique globale  $R_{max}$  tolérée. La plateforme de caractérisation doit donc considérer les interfaces thermiques comme étant non-négligeables lors des mesures sur les récepteurs. Les résistances des TIMs peuvent cependant être réduites en utilisant un TIM avec un coefficient de conduction thermique plus élevé ou en diminuant l'épaisseur de l'interface. Or, l'analyse de telles améliorations dépasse le cadre de cet ouvrage.

Quant à l'interface entre le récepteur et le système de refroidissement, on suppose l'application de la même pâte thermique à une épaisseur  $t_{TIM}$ . La résistance de cette interface  $R_{TIM}$  dépend de la diffusion du flux thermique sur l'ensemble de l'aire du récepteur. Dans le cas où cette dispersion est négligeable, l'aire de la résistance thermique vaut  $A_s$ .  $R_{TIM}$  est donc égal à  $R_{TIM\ cell}$ . Dans le cas où la dispersion est uniforme sur tout le récepteur, l'aire de la résistance thermique vaut  $A_{rec}$  et  $R_{TIM}$  est 16 fois moins résistant.

Bref, la résistance thermique du TIM entre le récepteur et le système de refroidissement est grandement influencée par la capacité de diffusion de la chaleur par le récepteur. Cela met en évidence l'importance que revêt la distribution de la chaleur dans le récepteur. Ainsi, une plus grande diffusion dans le récepteur abaisse la résistance thermique de ce TIM. Cette réduction de la résistance pourrait également s'appliquer au système de refroidissement. Ce paramètre doit donc être mesuré par la plateforme de caractérisation, car il influe grandement sur la résistance du TIM et sur les autres résistances en aval, avant d'atteindre l'environnement.

**Résistance thermique de la convection récepteur-environnement  $R_{rec\ conv}$** 

La taille des récepteurs couramment utilisés dans l'industrie varie beaucoup. Par contre, une dimension de 4 cm de côté nous semble représentative de ce que nous avons observé. Nous supposons aussi la condition idéalisée d'une distribution uniforme de la chaleur sur toute sa surface  $A_{rec}$ . On pose que sa surface supérieure est soumise à une forte convection naturelle dont le coefficient de convection  $h_{rec}$  du récepteur est de  $25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ . En soustrayant la surface couverte par la cellule, la résistance  $R_{rec\ conv}$  est de :

$$R_{rec\ conv} = \frac{1}{h_{rec} * A_{rec}} = \frac{1}{15 \frac{W}{m^2 \cdot K} * ((0.04m)^2 - (0.01m)^2)} = 44.4 \frac{K}{W} \quad (2.7)$$

Les résistances thermiques  $R_{conv\ cell}$  et  $R_{rec\ conv}$  sont élevées comparées à la limite acceptable de la résistance du modèle du module de refroidissement ( $R_{max}$ ). Il en va de même avec le rayonnement thermique de la cellule  $R_{ray\ cell}$ . Même en supposant une distribution uniforme de la température à la surface du récepteur et en négligeant sa résistance ( $R_{rec2}$ ), la convection naturelle à la surface de ce dernier représente moins de 3 % de l'évacuation globale de la chaleur. De plus, le coefficient de convection naturelle a été posé dans une condition de meilleur cas. Bref, l'ensemble de la chaleur doit être évacuée par le système de refroidissement, ce qui permet de négliger les autres trajets thermiques. Par extension,  $R_{conv\ cell}$  est également négligeable, car l'aire d'échange thermique avec l'environnement est encore plus petit.

Puisque la convection et le rayonnement de la cellule, ainsi que la convection à la surface supérieure du récepteur sont négligeables, il ne reste qu'un seul trajet thermique. Ce trajet est celui traversant les éléments suivants : la cellule, le TIM cellule-récepteur, le récepteur, le TIM récepteur-système de refroidissement, le système de refroidissement et finalement l'environnement ou le fluide de refroidissement. L'existence d'un unique trajet thermique implique que les résistances sont disposées séquentiellement. La somme de ces résistances, et à fortiori chacune d'entre elles, ne doit pas dépasser  $0.69 \frac{^{\circ}C}{W}$  pour que la cellule reste sous les 70 °C lorsqu'illuminée à 1000X.

Comme il sera vu plus loin dans la présente section, il y a un phénomène de diffusion latérale dans diverses composantes, ce qui implique l'utilisation d'un modèle 2D pour bien représenter le flux thermique. Ce phénomène implique que les résistances des composantes sont inter-reliées, car l'aire du flux thermique entrant dans une section est influencée par la composante précédente. Les chapitres suivants traiteront donc la diffusion thermique selon une approche 2D. Cependant, l'utilisation de résistances en série est un bon moyen

de visualiser le réseau de résistances, le flux thermique traversant séquentiellement chacun des éléments du trajet.

### Résistances thermiques du récepteur et du système de refroidissement

Il est impossible d'estimer adéquatement les résistances du récepteur et du système de refroidissement, car leurs performances et leur fonctionnement dépendent d'une variété de facteurs qui nous sont inconnus. Or, on peut calculer l'aire  $A_{ref}$  nécessaire au système de refroidissement pour évacuer le flux thermique par convection naturelle. En supposant toutes les autres résistances négligeables et en supposant qu'une solution permette de négliger également  $R_{TIMcell}$ , les résistances du récepteur et du système de refroidissement équivalent à  $R_{max}$ . Avec un fort coefficient de convection naturelle  $h_{ref\ conv}$  de  $15 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , l'aire  $A_{ref}$  doit avoir une valeur minimale de :

$$R_{ref\ conv} = 0.69 \frac{K}{W} = \frac{1}{h_{ref\ conv} * A_{ref}} = \frac{1}{15 \frac{W}{m^2 \cdot K} * A_{ref}} \quad (2.8)$$

$$A_{ref} = 966 \text{ cm}^2$$

Afin de satisfaire à la condition décrite à la section précédente, cet aire est donnée dans le cas idéalisé où la température est uniformément répartie dans le système de refroidissement, ce qui est un cas très idéalisé de la réalité. De plus, une aire de refroidissement de près de 1000 fois plus grande que la cellule est difficilement applicable en pratique. Si l'on considère  $R_{TIMcell}$  tel que calculé et qu'on limite la résistance globale à  $R_{max}$ ,  $R_{ref\ conv}$  sera alors de :

$$R_{rec\ conv} = R_{max} - R_{TIMcell} = 0.69 \frac{W}{K} - 0.34 \frac{W}{K} = 0.35 \frac{W}{K} \quad (2.9)$$

Une si faible résistance pose une difficulté majeure à l'utilisation refroidissement passif lorsque la concentration est de l'ordre de 1000X avec une cellule de  $1 \text{ cm}^2$ . Les systèmes de refroidissement actifs semblent donc plus adaptés à de telles concentrations.

#### 2.1.4 Technologies de refroidissement pour CPV

De nombreux types de systèmes de refroidissement peuvent être rattachés au récepteur. Ces systèmes de refroidissement sont divisés en deux catégories, soit le refroidissement actif et le refroidissement passif. Les systèmes dits actifs utilisent une source extérieure d'énergie pour fonctionner et sont généralement plus complexes que les systèmes passifs.

Tableau 2.2 Estimation des résistances thermiques d'un module de refroidissement avec cellule

Nom	Résistance	Définition
-	K/W	-
$R_{ray\ cell}$	14 706	Résistance de rayonnement cellule-environnement
$R_{conv\ cell}$	40 000	Résistance de convection cellule-environnement
$R_{cell}$	0.025	Résistance en conduction de la cellule
$R_{TIM\ cell}$	0.34	Résistance du TIM entre la cellule et le récepteur
$R_{rec\ 1}$	Non défini	Résistance en conduction du récepteur via le système de refroidissement
$R_{rec\ 2}$	Non défini	Résistance de diffusion en conduction du récepteur via le système de refroidissement
$R_{rec\ cond}$	Non défini	Résistance en conduction du récepteur via sa surface supérieure
$R_{rec\ TIM}$	0.02 à 0.34	Résistance du TIM entre le récepteur et le système de refroidissement
$R_{rec\ conv}$	44.4	Résistance de convection de la face supérieure du récepteur
$R_{ref}$	Non défini	Résistance interne du système de refroidissement
$R_{ref\ conv}$	Non défini	Résistance en convection du système de refroidissement avec l'environnement
$R_{max}$	0.69	Résistance totale maximale entre l'environnement et la cellule pour une température de surface 70 °C

Au contraire, les systèmes passifs ne nécessitent pas d'énergie électrique extérieure ou générée par la cellule pour fonctionner.

### Refroidissement actif

Certaines technologies de refroidissement actif offrent un potentiel intéressant pour de hautes concentrations solaires [4]. Or, pour mesurer leur impact sur la production nette d'électricité, il faut soustraire l'électricité que ces systèmes utilisent, soit la puissance parasitique, de l'énergie produite. Ces systèmes offrent des refroidissements élevés et permettent ainsi d'accéder à de plus hautes concentrations solaires. Quelques exemples de ces technologies sont illustrés à la figure 2.3.

### Refroidissement passif

Les systèmes de refroidissement passifs ont l'avantage ne pas réduire la quantité nette d'électricité produite par l'ensemble de l'installation. Cependant, ces systèmes ont généralement des capacités de refroidissements moindres que les systèmes actifs. Certains auteurs estiment que les systèmes de refroidissement passifs peuvent être utilisés pour des cellules non groupées allant jusqu'à une concentration de 1000X [24] pour des cellules ayant un diamètre de 5 mm ou moins. Quelques exemples de ces technologies sont présentés à la figure 2.4.

### Impact pour la plateforme de caractérisation

Une installation fonctionnant à une concentration de 1000X aurait donc le potentiel d'être refroidie passivement, à condition de limiter la taille de la cellule. Les systèmes de refroidissement actifs sont à envisager au-delà de cette concentration pour le refroidissement de cellules égales ou supérieures à  $1 \text{ cm}^2$ . Il faut donc que la plateforme soit adaptée à ces deux types de refroidissement.

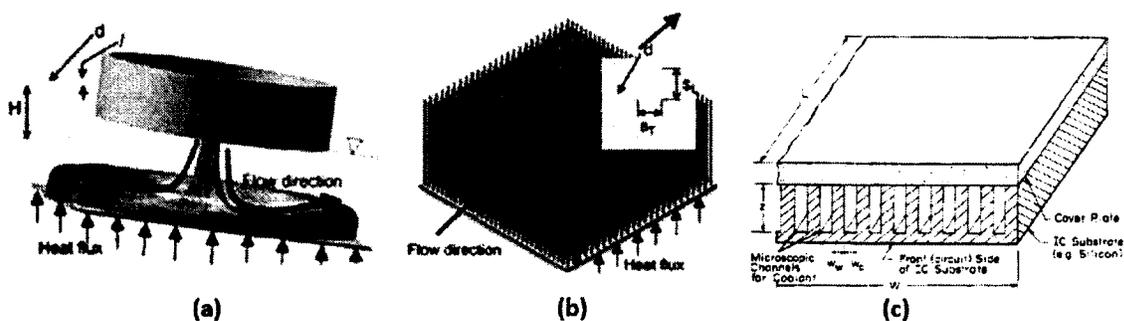


Figure 2.3 Exemples de refroidissement actif : jet perpendiculaire à une paroi [25] (a), refroidissement à aiguilles [25] (b) et refroidissement par microcanaux [35] (c)

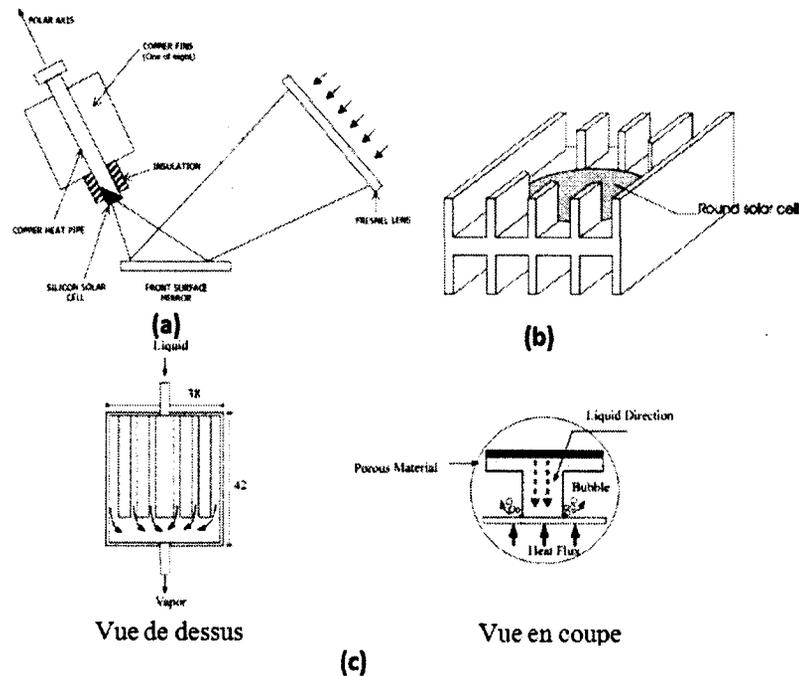


Figure 2.4 Exemples de refroidissement passif : caloduc [9] (a), ailettes [30] (b) et action capillaire [10](modifié) (c)

## 2.2 Types de caractérisation thermique

Même s'il ne semble pas exister de plateforme de caractérisation pour des modules de refroidissement en CPV, d'autres types de caractérisation thermiques fournissent des éléments pertinents au présent projet. Ceux-ci sont partiellement repris dans l'introduction de l'article à la section 3.3. Une analyse est réalisée sur des études théoriques et expérimentales définissant les propriétés thermiques de différentes composantes de dissipation thermique.

### 2.2.1 Caractérisation théorique

Un domaine analogue au solaire concentré sur le plan du refroidissement est celui de la microélectronique. Or, contrairement au solaire concentré, de nombreuses études dans l'encapsulation de composantes électroniques (*packaging*) portent sur la caractérisation des récepteurs. La figure 2.5 illustre le modèle utilisé par Feng [16]. D'un point de vue thermique : la puce (*heat source*) correspond à la cellule, le récepteur thermique (*heat spreader*) correspond au récepteur et le puits thermique (*heat sink*) au système de refroidissement.

#### Méthodologie

Pour caractériser le récepteur, Feng considère d'abord le cas pour lequel la source de

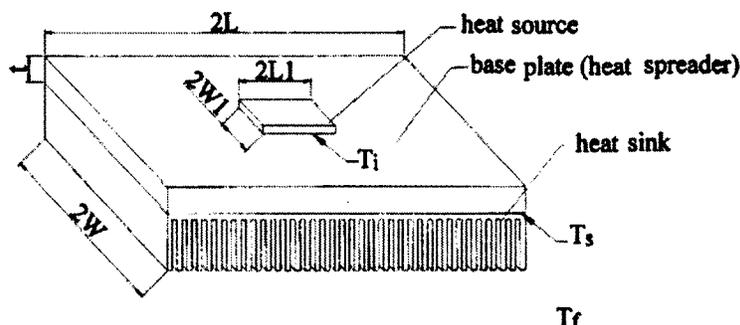


Figure 2.5 Structure de refroidissement d'une puce électronique [16]

chaleur est distribuée sur toute l'aire de la surface supérieure du récepteur. Il calcule ensuite la résistance thermique normale à la surface d'injection du récepteur. Autrement dit, il calcule la résistance thermique en 1D en fonction de l'épaisseur du récepteur en considérant que la chaleur est injectée sur toute la surface du récepteur. Pour tenir compte du fait que la source de chaleur est localisée, il ajoute une résistance en série à celle trouvée précédemment.

Feng utilise ensuite des paramètres géométriques adimensionnels pour déterminer un paramètre de performance, nommé résistance de diffusion adimensionnelle ( $\psi$ ). Ce dernier est affiché en fonction d'une épaisseur adimensionnelle pour différents nombres de Biot (adapté par Feng pour la géométrie analysée) et est présenté à la figure 2.6. Les différents paramètres géométriques sont représentés par les lettres grecques  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$  et  $\tau$ . Le nombre de Biot s'exprime comme étant :

$$Bi = \frac{h * t}{k} \quad (2.10)$$

où  $k$  est la conductivité thermique du récepteur,  $t$  est l'épaisseur du récepteur et  $h$  est le coefficient de convection où le refroidissement agit.

Une telle méthodologie possède les avantages suivants quant à l'élaboration d'une plateforme de caractérisation :

- La diffusion thermique latérale influence la performance du refroidissement. Elle doit donc être incluse dans la caractérisation.
- La diffusion dépend du nombre de Biot. Ce dernier est en partie fonction de la puissance de refroidissement à l'interface du récepteur thermique et de la conductivité du récepteur. Il est donc nécessaire d'inclure le système de refroidissement dans la caractérisation du récepteur.

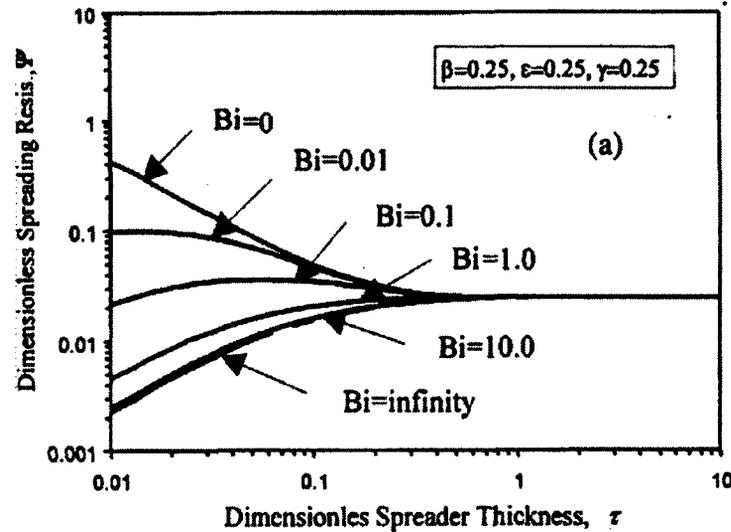


Figure 2.6 Résistance de diffusion thermique adimensionnelle d'un récepteur en fonction de sa résistance et de son épaisseur adimensionnelle [16]

### Limitations

L'approche proposée par Feng ne peut être utilisée telle quelle, car :

- Il est impossible d'utiliser une géométrie adimensionnelle pour tous les types de récepteurs, leur forme pouvant être irrégulière.
- L'approche utilise la conductivité thermique d'un récepteur isotrope et composé d'un seul matériau. Peu de récepteurs correspondent à ce critère.
- La résistance de dispersion ne fournit pas un indice adéquat pour mesurer la performance thermique du récepteur. Par exemple, pour une même dissipation sur deux récepteurs de tailles différentes, le récepteur avec la plus grande taille aura une plus grande résistance thermique de diffusion (et une plus faible résistance normale à la surface d'injection) alors qu'il permettra une meilleure dissipation thermique.

Cette méthode possède donc d'importantes lacunes lorsqu'appliquée au domaine de la caractérisation expérimentale de récepteurs. Cela met en évidence la nécessité de développer une autre approche pour ce type de caractérisation.

### Autres cas analytiques et numériques

D'autres études analytiques, telles que celle réalisée par Sikka [31], ont développé des outils calculant analytiquement la distribution de température dans un système puce-récepteur et ont comparé ce dernier avec une solution numérique. Or, les modèles analytiques et numériques s'appliquent difficilement à au moins l'un des cas suivants :

- Le récepteur a une géométrie incompatible avec les modèles développés.
- Des données sont inconnues concernant la résistance thermique des interfaces, les dimensions du récepteur ou la conductivité du (ou des) matériau(x).
- La qualité de fabrication d'un prototype doit être évaluée.
- Les performances du système de refroidissement ne sont pas connues.

Ces limitations d'ordre général soulignent encore une fois la pertinence de développer une approche expérimentale afin de contourner de telles difficultés.

### 2.2.2 Caractérisation expérimentale par symétrie

La conductivité des matériaux est connue à l'aide de tests thermiques. Une approche afin de caractériser la conductivité thermique de matériaux est d'utiliser un montage de type sandwich avec un élément chauffant plat auquel deux échantillons sont symétriquement installés de chaque côté de cet élément [6]. La figure 2.7 illustre ce concept utilisé pour caractériser un polymère.

#### Méthodologie

Le principe consiste à passer un flux de chaleur à partir de l'élément chauffant vers les plaques refroidissantes. Ce flux passe au travers des échantillons et la symétrie assure que chaque échantillon reçoit environ la moitié de la chaleur produite par l'élément chauffant, supposant une isolation normale à ce flux suffisante. Les thermocouples mesurent la température de chaque côté des échantillons. L'installation est réalisée de sorte que le flux thermique soit normal à la surface des échantillons. On obtient la résistance thermique par la simplification de la loi de Fourier sur la conduction thermique écrite sous la forme :

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (2.11)$$

où  $\dot{Q}$  est le flux thermique,  $\Delta T$  est la différence de température entre les parois de l'échantillon et  $R$  est la résistance thermique de l'échantillon.

#### Intérêt

Cette approche propose un élément intéressant à appliquer à la plateforme de caractérisation : l'injection mesurée d'un flux de chaleur au travers d'un échantillon. Cela permet avec la loi de Fourier de trouver sa résistance thermique. Il faut alors déterminer la température de l'échantillon à l'entrée et à la sortie du flux.

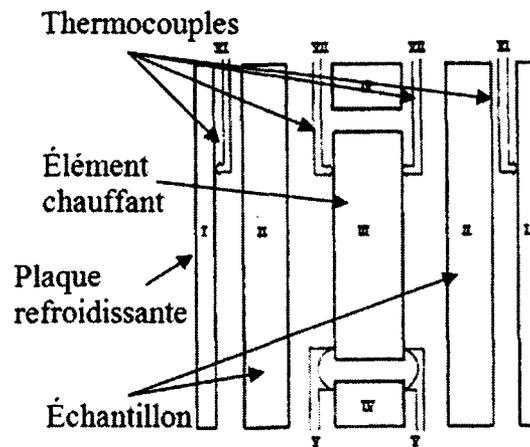


Figure 2.7 Montage expérimental de la caractérisation de la résistance thermique d'un polymère [6] \*Image modifiée de la version originale

### Limitations

Cette approche ne peut pas être utilisée telle quelle, puisqu'elle ne tient pas compte de la diffusion latérale pour calculer la résistance thermique. De plus, l'injection de chaleur n'est pas localisée à la surface de l'échantillon.

La considération pour mesurer la diffusion latérale d'une géométrie spécifique ne se retrouve habituellement pas dans les études de caractérisation de matériaux, l'objectif de tels travaux étant de mesurer des propriétés intrinsèques aux matériaux. Enfin, il demeure difficile de comparer la qualité d'un assemblage, puisque la mesure implique une symétrie pour définir le flux traversant chacun des échantillons.

### 2.2.3 Caractérisation expérimentale par colonne d'injection

L'approche expérimentale proposée par Kempers [21] évite la nécessité de caractériser deux échantillons, contrairement à l'approche par symétrie. Cette méthode, utilisée pour mesurer la résistance thermique de TIMs, utilise un seul élément chauffant et un seul puit thermique. Ceux-ci sont reliés thermiquement à l'aide de deux colonnes auxquelles des capteurs de température ont été placés à différents niveaux. Un échantillon est inséré entre ces colonnes et une isolation autour du montage assure un flux thermique unidirectionnel. Une schématisation du principe utilisé par Kempers est présentée à la figure 2.8 (a), alors que la schématisation de son montage est présentée à la figure 2.8 (b).

Des approches similaires ont été également utilisées par Tzeng [36] et Stern [33] pour la caractérisation de TIMs. Les méthodologies de Kempers, Tzeng et Stern sont toutes

inspirées de la norme ASTM-D5470, traitant notamment d'une méthode de mesure de la conductivité thermique apparente de matériaux d'états allant de visqueux à solides.

### **Méthodologie**

On calcule le flux thermique à l'aide des mesures de température des capteurs thermiques, ainsi qu'avec l'aire et de la conductivité thermique des colonnes. Kempers détermine par extrapolation la température aux surfaces de l'échantillon, représentant le  $\Delta T$ . L'équation 2.11 peut ensuite être utilisée pour trouver la résistance thermique de l'échantillon. Il est alors possible d'obtenir la conductivité thermique de l'échantillon à l'aide de ses propriétés géométriques.

### **Intérêt**

Le concept d'injection d'un flux contrôlé est une approche réaliste pour la caractérisation de modules de refroidissement. Celui-ci peut effectivement simuler la chaleur générée par une cellule dans un module CPV. Le fait de ne caractériser qu'un seul échantillon à la fois permet une meilleure comparaison entre les échantillons testés en évitant de requérir à deux échantillons identiques à la fois. De plus, ce concept de caractérisation semble particulièrement adapté pour la mesure de résistances de l'ordre de grandeur des TIMs, l'une des résistances majeures des modules de refroidissement. Ce concept sera d'ailleurs utilisé pour la plateforme de caractérisation.

### **Limitations**

Les limitations pour le concept de caractérisation avec colonne d'injection sont sensiblement les mêmes qu'avec le concept utilisant la symétrie. Il ne fournit donc pas d'information sur la diffusion latérale et doit être modifié pour caractériser des modules de refroidissement complets.

Il semble donc que le concept de colonne d'injection soit répandu pour la mesure de résistances thermiques. Or, contrairement aux matériaux classiques ou TIMs, les endroits où mesurer les températures pour calculer le  $\Delta T$  dans le cas de différents systèmes de refroidissement n'est pas trivial. C'est pourquoi des exemples de mesures de résistances sur des systèmes de refroidissement en microélectronique et en CPV sont analysées à la prochaine sous-section.

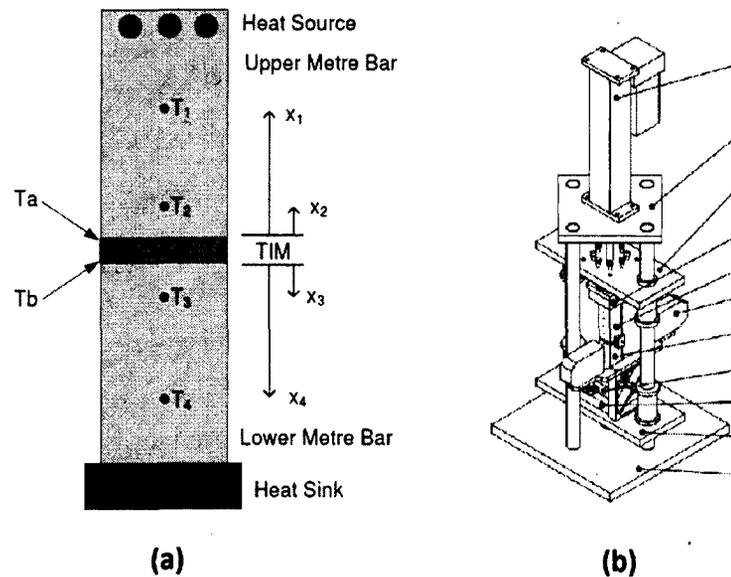


Figure 2.8 Montage expérimental de la caractérisation de la résistance thermique d'un TIM par colonne d'injection. (a) Schématisation du fonctionnement du montage. Les termes  $T_1$  à  $T_4$  et  $x_1$  à  $x_4$  représentent respectivement les températures lues par les capteurs thermiques 1 à 4 et leur position.  $T_a$  et  $T_b$  sont respectivement les températures extrapolées de la surface supérieure et inférieure du TIM [21] (b) Présentation du montage [21] \*Image modifiée de la version originale

### 2.2.4 Caractérisation expérimentale pour systèmes de refroidissement

Plusieurs études traitent des performances de systèmes de refroidissement destinés au solaire concentré ou à la microélectronique. Généralement, le critère de performance est inspiré de l'équation 2.11, auquel la différence de température est adaptée à la géométrie du module à caractériser. Le flux thermique est un élément généralement posé.

Dans son travail, Chen [10] propose un système de refroidissement avec loupes à pompage capillaire destiné au refroidissement de composants électroniques, illustré à la figure 2.4(c). Il définit une résistance thermique selon le flux thermique injecté à son module, ainsi que d'après un  $\Delta T$  entre l'air ambiant et la température moyenne de la surface utilisée du système de refroidissement en contact avec l'élément chauffant.

Harms [18] a développé des microcanaux dont il a mesuré les performances de refroidissement. Pour ce, il a réalisé un montage dans lequel il pose un élément chauffant sur les microcanaux. Il a ensuite mesuré la résistance thermique entre la température moyenne

de l'eau utilisée dans les microcanaux et la température à la surface de l'élément chauffant. Le flux thermique est supposé égal à la puissance injectée dans l'élément chauffant.

Royne [29] a réalisé des tests expérimentaux pour la conception de systèmes de refroidissement par jet d'eau normaux à la paroi. Ces systèmes sont destinés à des modules CPV où l'espace entre les cellules est restreint. Elle utilise une variante de la résistance thermique pour calculer les performances de ces systèmes, soit le coefficient de transfert de chaleur. Celui-ci se définit par le flux thermique par unité de surface, divisé par le  $\Delta T$  entre l'élément chauffant et l'eau de refroidissement.

Dans les trois exemples précédents, on remarque que le calcul des performances d'un système de refroidissement est mesuré par la résistance thermique (ou un terme directement relié à la résistance thermique) entre la surface exposée à la source de chaleur et un milieu environnant, soit l'air ambiant ou un liquide refroidisseur. Ces deux points de référence pour le calcul du  $\Delta T$  semblent donc appropriés pour la plateforme de refroidissement, ceux-ci pouvant être retrouvés dans tous types de système de refroidissement. Il serait alors intéressant de vérifier s'il existe des standards pour des modules de refroidissement ou des composantes d'une envergure équivalente.

### 2.2.5 Caractérisation expérimentale pour puces électroniques

Il existe dans l'industrie de la microélectronique un organisme de standardisation, nommé *JEDEC Solid State Technology Association*, décrivant des procédures pour mesurer les performances thermiques des puces électroniques. Cet organisme suggère des cartes informatiques tests et des conditions standardisées pour évaluer les propriétés thermiques d'une puce à caractériser. Elle offre une large gamme de procédures adaptées à différents contextes d'utilisation. La JESD51-12 - Guidelines for Reporting and Using Electronic Package Thermal Information [19] a été choisie pour étudier l'aplicabilité de ces procédures aux modules de refroidissement CPV.

#### Méthodologie

La principale métrique utilisée est la résistance thermique entre l'une des interfaces de la puce et un milieu pouvant être l'air ambiant, la carte électronique (sous la puce) ou le boîtier (au-dessus de la puce). La puissance à dissiper est prédéterminée. Les procédures utilisent donc essentiellement l'équation 2.11 pour calculer la résistance thermique.

#### Intérêt

L'utilisation du  $\Delta T$  entre la température à la jonction et le milieu ambiant, est directe-

ment applicable aux modules de refroidissement pour CPV et corrobore avec les méthodes utilisées pour caractériser les systèmes de refroidissement de la sous-section 2.2.4.

### **Limitations**

La principale lacune de ces procédures est de ne fournir aucune mesure permettant d'évaluer la diffusion latérale de la chaleur.

Bref, l'analyse des trajets thermiques d'une installation CPV a mis en évidence la nécessité de diminuer la résistance thermique des modules de refroidissement dans une installation CPV afin d'augmenter la concentration solaire sur la cellule. Quant à l'étude du module de refroidissement, celle-ci a souligné l'importance de la diffusion latérale dans le récepteur pour refroidir la cellule. Or, les modèles analytiques et les études expérimentales relatives à la caractérisation de matériaux ne semblent pas permettre une évaluation de la diffusion thermique latérale des récepteurs sans éviter certaines carences. Dans ce contexte, développer une méthodologie et une plate-forme de caractérisation caractérisant la diffusion latérale de récepteurs réels et quelconques fournirait un outil original pour l'évaluation de nouveaux récepteurs.



# CHAPITRE 3

## CARACTÉRISATION THERMIQUE

### 3.1 Avant-propos

Cette section présente l'article scientifique lié à ce mémoire. Les informations complémentaires sont présentées en annexe, dont la preuve de soumission présentée à l'annexe J.

**Auteurs et affiliation :**

- Louis-Michel Collin : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, faculté de génie, Département de génie mécanique.
- Osvaldo J. Arenas : étudiant au doctorat, Université de Sherbrooke, faculté de génie, Département de génie électrique et informatique
- Luc G. Fréchette : professeur, Université de Sherbrooke, faculté de génie, Département de génie mécanique.
- Richard Arès : professeur, Université de Sherbrooke, faculté de génie, Département de génie mécanique.

**Date de soumission de la version originale :** 29 mai 2012

**Date de soumission de la version révisée :** 7 février 2013

**Revue :** IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology

**Titre français :** Résistance thermique et plateforme de caractérisation de la diffusion thermique pour boîtiers de cellules photovoltaïques

**Contribution au document :**

Cet article contribue au présent mémoire en décrivant une méthode de caractérisation thermique originale. Il y présente également le développement et la validation d'une plateforme permettant d'appliquer une telle méthode. Les résultats fournissent des informations pertinentes à la conception et à la comparaison de récepteurs thermiques destinés au photovoltaïque concentré.

**Résumé français :** Le photovoltaïque concentré focalise la lumière solaire sur la surface d'une cellule plus petite que l'ouverture initiale, rendant l'utilisation de cellules solaires multijonctions à haute efficacité beaucoup plus rentables. Cependant, le flux thermique

élevé généré avec une lumière concentrée peut augmenter la température de la cellule et réduire le gain à utiliser une haute concentration. Les boîtiers de cellules (récepteurs) à faible résistance thermique associés avec un puits thermique efficace peuvent amoindrir ce problème. Le présent travail suggère une nouvelle méthode expérimentale, ainsi qu'une plateforme de caractérisation thermique mesurant la performance thermique du boîtier de la cellule solaire. La plateforme injecte un flux thermique calibré dans un récepteur test pour y mesurer sa résistance thermique, démontrant une précision et une reproductibilité de  $\pm 0.15$  °C/W. Une métrique pour évaluer la capacité de diffusion thermique d'un récepteur est définie et extraite des mesures expérimentales effectuées avec différentes conditions limites. Des configurations multiples de récepteurs et de matériaux ont été caractérisés, démontrant que la méthodologie de tests proposée, ainsi que la plateforme, peuvent définir la capacité de diffusion thermique du sujet étudié. Les résultats mettent également en évidence l'importance des interfaces thermiques et les avantages de diffuser la chaleur dans les couches métalliques avant de la conduire au travers des couches diélectriques du récepteur. La métrique proposée, ainsi que la plateforme de caractérisation seront donc avantageuses pour la conception, le développement expérimental et la sélection de récepteurs CPV, ainsi que de leur système de refroidissement.

# Thermal Resistance and Heat Spreading Characterization Platform for Concentrated Photovoltaic Cell Receivers

*Louis-Michel Collin, Osvaldo Arenas, Luc G. Fréchet, Richard Arès*

Centre de recherche en nanofabrication et nanocaractérisation (CRN<sup>2</sup>), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada

## 3.2 Abstract

Concentrated photovoltaics (CPV) focus the sunlight on a cell area smaller than the aperture area, making the use of highly efficient multi-junction solar cells cost-effective. However, the high heat flux generated under concentration can raise the cell temperature and reduce the benefits of higher concentration. Low thermal resistance cell packages (receivers) associated with effective heat sinking can alleviate this problem. This work proposes a new experimental method and characterization platform to measure the thermal performance of a solar cell receiver in a specific cooling module. The platform injects a calibrated heat flux into a test receiver to measure its contribution to the thermal resistance, demonstrating an accuracy and reproducibility of  $\pm 0.15$  °C/W. A metric to evaluate the heat spreading capability of the receiver is defined and extracted from experimental measurements conducted with different thermal boundary conditions. Multiple receiver configurations and materials were characterized, demonstrating that the proposed test methodology and platform can capture their impact on the heat spreading capabilities. Results also highlight the importance of thermal interfaces and the benefits of spreading the heat in metallic layers before conducting it through the dielectric layers that form the receiver. The proposed metrics and characterization platform will therefore be beneficial for the design, experimental development, and selection of CPV receivers and cooling modules.

Keywords - concentrated photovoltaics, packaging, heat spreading, thermal characterization, thermal resistance

## 3.3 Introduction

The use of photovoltaics is a promising alternative to fossil fuels or nuclear energy for electrical power generation. However, its high cost per Watt compared to well-established technologies remains a major challenge that must be tackled for photovoltaics to achieve large-scale implementation. An approach to potentially reduce its costs is to concentrate

the solar energy on high efficiency cells, a technique referred to as concentrated photovoltaics (CPV). By using mirrors or lenses to focus the sunlight on a 200X to 1000X smaller region, the area of cells required is dramatically reduced (Fig. 3.1). High efficiency III-V multi-junction cells (which reach efficiencies beyond 40 % [17]) become economically viable with concentration, increasing the output power per ground area.

The large irradiation flux leads however to thermal management challenges, since part of the incoming light is converted into heat and tends to raise the cell's operating temperature. This temperature increases with concentration, resulting in detrimental effects on cell efficiency % [22].

An efficient heat removal system must be attached to the cell to preserve its performance at high concentration. As described by Araki and al. [7], the packaging or substrate supporting the cell, called the receiver, draws most of the heat away from the cell towards the heat sink. The receiver and the heat sink together are called here a "cooling module".

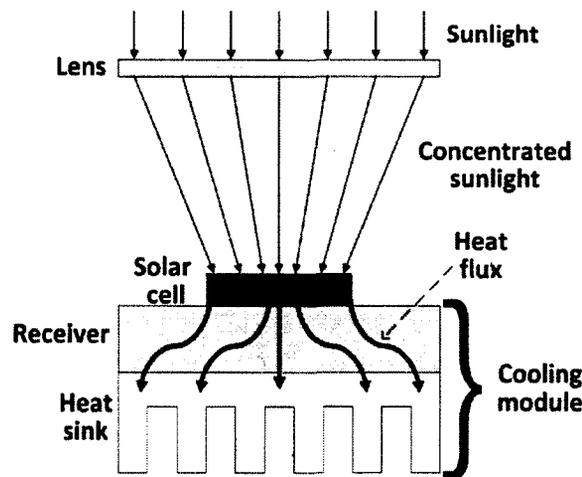


Figure 3.1 Schematic of a typical CPV module using lens.

Generally, the receiver's surface is broader than the cell and spreads the heat while conducting it towards a heat sink. Such spreading provides a wider area for heat conduction, reducing the heat flux and the apparent thermal resistance of the elements downstream of the receiver. So, by spreading the heat flux close to the cell, the thermal resistance of the other components becomes less important. Since the receiver is one of the first elements in the heat flux path, its spreading capabilities are critical to the overall thermal performance of the cooling module. Therefore, the receiver's spreading capability should have its own performance criterion and should be specifically characterized.

Previous work in this area stems mostly from the microelectronic packaging field, since it shares similar conditions with CPV, such as size, heat load and the need for thermal spreading.

Typically, the thermal performance of cooling modules is measured with the thermal resistance between the cell's (or chip's) junction and the ambient or cooling fluid [30] [4] [35]. A controlled power is generated in the cell, making a temperature gradient between the junction and the environment. The Fourier's law of conduction is used to obtain the module's overall thermal resistance. However, such an approach gives no insight on the thermal spreading within the cooling module because the whole module is taken as a single thermal resistance.

Some analytical studies on simple heat spreader geometries have successfully shown the importance of thermal spreading on the overall thermal resistance. As proposed by Feng and al. [16], the non-dimensional Biot number characterizes the ability of a cooling system to spread the heat. It is the ratio of thermal conduction resistance within a receiver to the convection thermal resistance from the receiver's surface. It is expressed as  $Bi = ht/k$ , where  $h$  is the convection coefficient applied below the receiver,  $t$  is the receiver's thickness and  $k$  its thermal conductivity. According to their results, if the Biot number is over 10, the resistance to conduction dominates and prevents further heat spreading.

Similarly, Ellison's [15] analytical studies used the Biot number as a parameter to describe the spreading resistance. He states however that the receiver's thermal spreading is dependent on the cooling intensity.

It was also noticed that the thermal spreading plays a major role in the total thermal resistance. However, receiver thicknesses being generally small (about 1 to 3 *mm*), the convection coefficient to obtain the Biot number of 10 cannot be reached with most of the existing receivers. So, receivers need to be characterized within a specific cooling module to have significance.

Although these analytical studies are powerful tools to analyze thermal behavior in a receiver, they have limitations in the following cases :

- Complex and irregular geometries for receivers or cooling systems ;
- Prototype evaluation ;
- Unknown properties (anisotropic thermal resistance, thermal interface thicknesses, surface roughness, etc.)

Moreover, the Biot number cannot be used as is for multi-layered structure receivers. As demonstrated later in the article, the layer order in this type of receivers has an impact on the cooling performance, leaving an equivalent Biot number to be developed for those cases.

In many occasions, heat spreading on a receiver is experimentally evaluated using thermal sensors [40], or thermal imaging [20]. These techniques provide temperature data that are specific to a receiver and can hardly be used to compare different configurations. Furthermore, the back surface of the receiver needs to be accessible for infrared imaging or thermocouple measurements, which is not always possible in assembled cooling modules.

As it will be shown in this work, thermal resistance of the materials is not sufficient to represent the spreading capability of a receiver, since receivers with the same materials have shown different overall thermal resistance depending on their specific configuration.

The Biot number is therefore not sufficient to adequately describe the cooling performance and spreading capabilities of a receiver. A complete system must be considered, including the heat sink and the thermal interfaces.

In this work, an experimental approach based on thermal resistance is selected to address real configurations. Measuring the overall thermal resistance of a cooling system does not provide much insight and guidance on its detailed design however. So, an original method is developed to experimentally extract the heat spreading capabilities of a receiver. Experimentally isolating the heat spreading effect from the receiver is not a simple task, since it forms a distributed resistance network when included in a cooling module. As the downward face of the receiver cannot be considered at constant temperature nor with a uniform heat flux due to spreading, experimentally measuring its thermal resistivity is ill-defined. The method proposed here consists of comparing measurements with different thermal boundary conditions that either emphasise or not the spreading effect so it can be isolated. However, measurements are punctual in time and do not take into account that component resistances might change over time due to ageing. Such issue is critical for CPV installation design as they are generally installed for years, but outside the scope of this work.

The goal of this work is to develop a characterization platform capable of measuring a representative value of both the thermal resistance of a cooling module and the thermal spreading brought by its receiver. The test apparatus is similar to Kempers [21] and Stern [33] as it uses a heat flux produced by a heater and evacuated by a heat sink. The heat injection uses an instrumented column to reproduce the heat input from solar

radiation on the cell's surface. An active heat sink is used as a reference to analyze the receiver's impact in the cooling module.

The development of the thermal performance metrics and its measurement technique are first presented in the methodology section. It is followed by the test apparatus design and its numerical validation. Finally, the method is experimentally validated with receivers. Thermal resistance and heat spreading capabilities are extracted from the measurements for various receiver materials and configurations, demonstrating the applicability of the proposed method.

### 3.4 Methodology

The method consists of measuring the thermal resistance of a module by applying a known heat load over the cell area and measuring temperature differences across the module. Two different boundary conditions are applied to the backside of the receiver: local cooling under the cell area (referred to as series characterisation) and uniform cooling over the entire receiver area (referred to as global characterisation). Thermal resistance is measured for both configurations and performance metrics are extracted. This section presents the experimental apparatus and test methodology to evaluate the receiver performance.

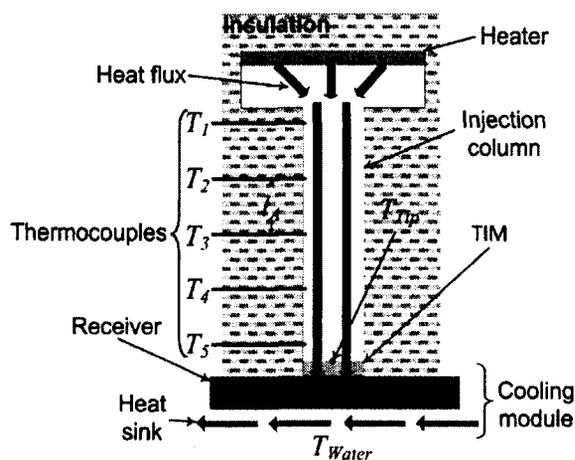


Figure 3.2 Schematic of the thermal characterization platform, illustrating the heat flux and temperature measurement locations.

#### 3.4.1 Experimental Test Apparatus

The test apparatus, illustrated in Fig. 3.2, consists of an electric heater that provides a controllable heat flux to the cell area by conduction through a column. To monitor the heat flux, temperature sensors are distributed along the length of the thermally conductive

column (as it will be further described below). The end of the column contacts the receiver on an area equivalent to a photovoltaic cell of 1 cm x 1 cm to simulate the heat flux that would occur under concentrated sunlight. A heat sink is then mounted on the opposite side of the receiver to complete the cooling module. Thermal insulation is applied to all the other surfaces to avoid heat loss. This method is most appropriate for modules with low thermal resistance, since heat loss to the surroundings will more likely be negligible compared to the dominant heat rate through the receiver.

### 3.4.2 Heat Flux Measurement

With sufficient thermal insulation, heat rate along the column can be considered constant. The heat rate,  $\dot{Q}$ , going through the column is then obtained from the simplified Fourier's law of conduction. In steady-state, uniform heat flux over a constant area column  $A$  is:

$$\dot{Q} = -k_c(T)A \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

where  $k_c(T)$  is the temperature-dependent thermal conductivity of the column material and  $dT/dx$  is the temperature gradient along the column's length. Integrating Eq. (3.1) between two temperature measurement locations,  $a$  and  $b$ , provides an expression for the heat rate as a function of these measurements:

$$\dot{Q}l_{a-b} = \int_b^a k_c(T)AdT \quad (3.2)$$

$$\dot{Q} = \frac{1}{l_{a-b}} [K_c(T)A]_{T_b}^{T_a} \quad (3.3)$$

where  $K_c(T)$  is the primitive of  $k_c(T)$  and  $l_{a-b}$  is the distance between the measurement points along the column. This formula assumes that heat losses are negligible, which will be a design requirement for the measurement column.

Thermal conductivity can vary significantly with temperature, which can induce undesirable uncertainty if constant values are assumed. The potentially high temperature drop along the column (on the order of 80 °C) therefore justifies the use of temperature dependent thermal conductivity. Expressing it as a second order polynomial,  $k_c(T) = \alpha T^2 + \beta T + \gamma$ , (3.3) becomes:

$$Q = \frac{A}{l_{a-b}} \left( \frac{\alpha}{3}(T_a^3 - T_b^3) - \frac{\beta}{2}(T_a^2 - T_b^2) + \gamma(T_a - T_b) \right) \quad (3.4)$$

where the constants depend on the column material. Equation (3.4) can be rewritten for the various temperature measurement locations along the column (1 to 5), providing an over-determined system of equations. A least-squares fit is then applied to the system of equations to find the heat rate  $\dot{Q}$  that minimizes the error with the temperature measurements. Detailed design and characterisation of this measurement will be given in section 3.5.

### 3.4.3 Characterization Procedures

The characterisation aims at evaluating the thermal resistance of the receiver and its spreading capability. The thermal resistance is obtained from the measured temperatures and heat rate, as:

$$R = \frac{T_{tip} - T_{water}}{Q} \quad (3.5)$$

where  $T_{tip}$  and  $T_{water}$  are respectively the temperatures of the column tip and heat sink coolant. For  $T_{tip}$ , an extrapolated value from Eq. (3.4) is used as there is no sensor at the tip for practical limitations. For  $T_{water}$ , the average of the measured inlet and outlet water temperatures is taken.

The measured thermal resistance will not only include the resistance of the receiver, but also of the other components, such as the thermal interface materials (TIM) and the heat sink. To extract the impact of the receiver, measurements with and without the receiver will be compared. However, the removal of the receiver also removes the receiver-heat sink interface. With this methodology, this thermal interface (TIM 2) is therefore included in the thermal resistance value extracted for the receiver. Such inclusion in the measurement is justified by the fact that this thermal interface only exists because the receiver must be joined to the heat sink. It depends on the design of the cooling module and not from the experimental apparatus.

For all reported measurements, a first test is conducted without a receiver to obtain the thermal resistance of the other components,  $R_c$ . A second test is then performed with the receiver to obtain the thermal resistance of the complete cooling module,  $R_m$ . The

difference between these resistances represents the impact of the receiver on the overall thermal resistance,

$$\Delta R_r = R_m - R_c \quad (3.6)$$

It should be noted that  $\Delta R_r$  will not simply be the thermal resistance for one-dimensional conduction through the layers forming the receiver, since the heat flux is spreading. Also, spreading in the receiver can reduce the thermal resistance of the other components (TIM and heat sink) by increasing the effective area for heat transfer through them. To distinguish normal conduction through the receiver from the lateral heat spreading effect, tests are done with different thermal boundary conditions. The procedure consists of measuring and comparing the *global* thermal resistance, including heat spreading (typical configuration), with the series thermal resistance that forces heat to flow directly through the receiver (without spreading).

*Global characterization* - For the global thermal resistance characterization, the heat sink covers the entire lower surface of the receiver. The set-ups required for the two measurements, with and without the receiver, are illustrated in Fig. 3.3. Their difference in thermal resistance represents the impact of the receiver in the global case,  $\Delta R_{r,g} = R_{m,g} - R_{c,g}$ . In this case,  $R_{m,g}$  represents the thermal resistance of the cooling module as it would normally be used in CPV.

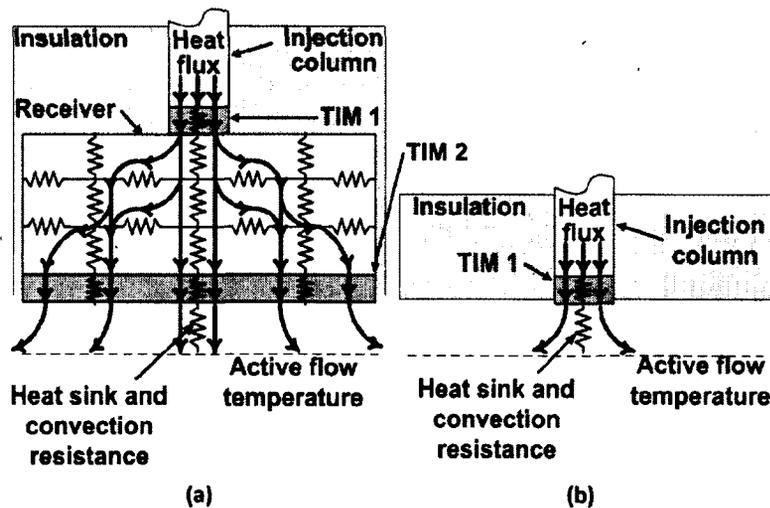


Figure 3.3 Resistance measurements for global characterization : (a) with receiver (receiver thickness exaggerated for clarity) ; (b) without receiver.

*Series characterization* - The series characterization aims to remove the spreading effect of the receiver, and only extract the normal (1D) thermal resistance through the layers of the

receiver. To do so, the heat flux on the backside of the receiver is limited to the same area as the injection column ( $1 \text{ cm}^2$ ), as illustrated in Fig. 3.4. A secondary column is placed between the receiver and the heat sink to guide the heat, whereas the other surfaces are thermally insulated. By comparing the thermal resistance with ( $R_{m,s}$ ) and without ( $R_{c,s}$ ) the receiver, the impact of these additional components is accounted for, so the impact of the receiver can be extracted:  $\Delta R_{r,s} = R_{m,s} - R_{c,s}$ .

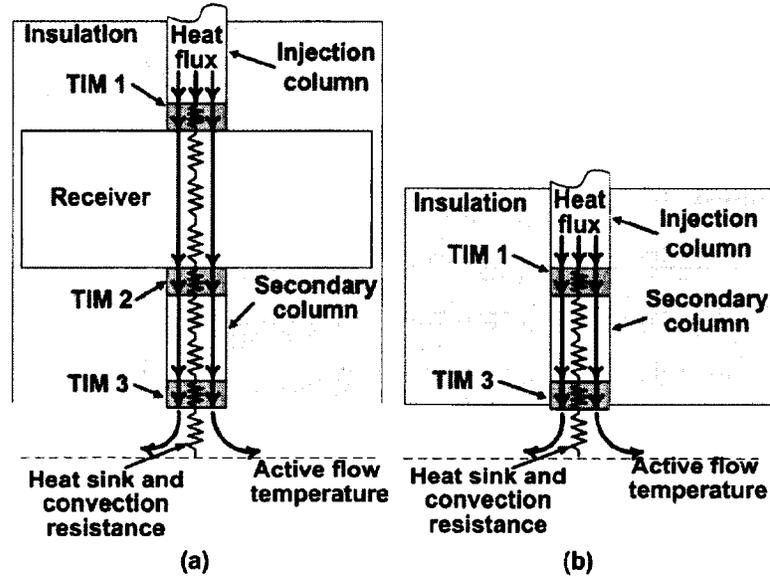


Figure 3.4 Resistance measurements for series characterization : (a) with receiver (receiver's thickness exaggerated for clarity) ; (b) without receiver.

It should be noted that tests with the receiver have one additional thermal interface than the tests without. The receiver's difference on thermal resistance,  $\Delta R_r$ , therefore includes a thermal interface (TIM 2). These interfaces can significantly increase the thermal resistance, so their reproducibility will be addressed in section 3.6.

#### 3.4.4 Figures of Merit

The first metric is the global thermal resistance of a complete module,  $R_{m,g}$ , which represents the overall thermal performance. Secondly, to quantify the spreading, the following dimensionless figure of merit,  $S$ , is defined:

$$S = \frac{R_s - R_g}{R_s} \quad (3.7)$$

This figure of merit represents the receiver's spreading contribution compared to its series resistance. The higher it is, the more a receiver contributes to reduce the cooling module re-

sistance. This metric will be evaluated from different receiver materials and configurations after presenting the detailed design and experimental evaluation of the test platform.

## 3.5 Test Platform Design

The platform is designed to ensure precise measurement of the thermal resistance for a range of receivers and test conditions. This section presents the configuration of the apparatus, justifies the component choices, and validates the design by numerical simulations.

### 3.5.1 System Configuration

The core components of the test apparatus are the instrumented heat injection column and the cooling plate, as shown in Fig. 3.5. Heat is provided at the top of the column and is directed towards the receiver. Embedded thermocouples along the length of the column are used to measure the heat load injected in the receiver. A liquid-cooled heat sink is mounted on the back of the receiver and maintained at a constant temperature. As shown in Fig. 3.6, a data acquisition system measures the thermocouple signals along the column and the coolant inlet and outlet temperatures with RTDs. The dimensions and component specifications were selected to maximize the heat flux and the temperature gradient in the column to minimize the measurement uncertainties, as described in the following subsections.

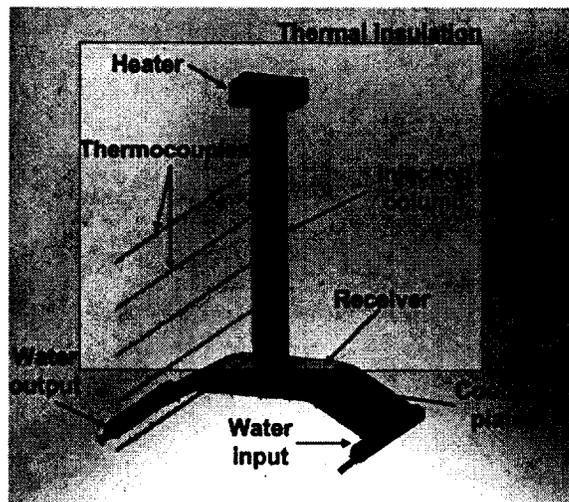


Figure 3.5 3D model of the core components in the characterization platform.

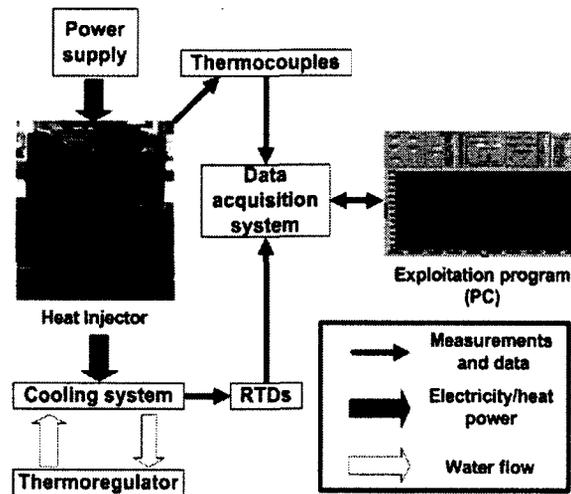


Figure 3.6 Thermal characterization platform with instrumentation.

### 3.5.2 Heat Injector

Heat is provided by a resistive ceramic heater (CER-1-01-00001 Ultramic™ from Watlow®) attached to the top of the column. Since the heater area ( $15\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ ) is larger than the column section ( $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ), the delivered heat flux will be concentrated. The first thermocouple is located sufficiently downstream of the area change to ensure a uniform temperature profile across the section. The column design is a compromise between high conductivity (to allow high heat rates) and large enough temperature differences (for precise heat rate measurement,  $\dot{Q}$ ). A copper alloy (C11000) is chosen for the column due to its high thermal conductivity. Five  $1\text{ mm}$  deep cavities for thermocouples are machined in the column starting at  $1\text{ cm}$  from the column's tip and  $1.75\text{ cm}$  from each other. Type "T" thermocouples with special limits of error of  $\pm 1.1\text{ }^\circ\text{C}$  and  $0.81\text{ mm}$  diameter are inserted in the cavities.

With this configuration, a temperature difference of  $85\text{ }^\circ\text{C}$  can easily be achieved between  $T_1$  and  $T_5$ , resulting in a total heat flux of  $50.7\text{ W/cm}^2$ . Furthermore, temperatures from  $20\text{ }^\circ\text{C}$  up to  $175\text{ }^\circ\text{C}$  can be measured near the heater ( $T_1$ ). Over this range of temperatures, the thermal conductivity of Cu can vary significantly. Based on the data by Robinson [28],  $k$  will go from  $387.9\text{ W/m-K}$  to  $375.0\text{ W/m-K}$  for  $20\text{ }^\circ\text{C}$  up to  $175\text{ }^\circ\text{C}$  respectively. Fitting Robinson's data gives the following coefficients for (3.4):  $\alpha = 1.62 \times 10^{-4}\text{ W/m-K}^3$ ,  $\beta = -0.203\text{ W/m-K}^2$ ,  $\gamma = 433.41\text{ W/m-K}$ .

An aerogel (Pyrogel® XT from Aspen Aerogels®) has been selected for the insulation. Its thermal conductivity is between  $0.01$  and  $0.04\text{ W/m-K}$  from room temperature up to  $350\text{ }^\circ\text{C}$ . A thickness of at least  $5\text{ cm}$  surrounds the column, allowing sufficient isolation to neglect heat losses in the injection column. A support structure is required to hold

the heater and injection column in contact with the heat sink. It is made of stainless steel 304, with relatively low thermal conductivity ( $16.2 \text{ W/m} - \text{K}$  [39]), and located upstream of the measurement column to prevent interfering with the measurements. For series characterizations, the secondary column is inserted between the receiver and the heat sink. It is a C11000 copper alloy column with  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  cross-section and  $3 \text{ cm}$  long. It is fixed to an open box filled with aerogel and has two guide rail blocs to ensure parallelism between the contact surfaces.

### 3.5.3 Cooling Module and Control

The cooling module is composed of the receiver, heat sink and thermal interfaces. For the receiver characterization, the heat sink should ideally provide a uniform fluid temperature for well-defined thermal resistance measurements. The model selected (CP25 Ascent™ from Lytron®) is a water-cooled heat sink with crossed channels. The plate offers a cooling surface of  $33 \text{ mm} \times 58 \text{ mm}$  and a thermal resistance down to  $0.33 \text{ }^\circ\text{C} - \text{cm}^2/\text{W}$ . A highly reproducible TIM is required to ensure proper thermal conduction between the components. The selected TIM (Tpli™ 210 from Laird Technologies Inc.) has a thermal conductivity of  $6 \text{ W/m} - \text{K}$ , is  $0.25 \text{ mm}$  thick and is resistant to compression, making it both reproducible and sufficiently low resistance.

Water temperature is maintained constant for steady-state testing using a Huber Ministat® circulating thermoregulator with an accuracy of  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  and a water flow rate of  $1.1 \text{ l/min}$ . The flow temperature is measured at the inlet and outlet of the heat sink using class A RTDs. They offer an accuracy of  $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C} @ 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , according to the norm DIN EN 60751, and are designed for water flow measurements.

### 3.5.4 Numerical validation

The thermal behavior of the test apparatus is analyzed, using finite element numerical simulations. The model includes the heater, the insulation, the injection column and the support structure. The heat losses, the temperature gradient in the column, the heater's maximum temperature, the heat flux through the column and the temperature at the thermocouple locations are analyzed to validate the design objectives and assumptions.

The injector geometry presents two axes of symmetry (except for the thermocouple sockets), so only a quarter of the injector was simulated, as shown in Fig. 3.7. The boundary conditions are presented in Table. 3.1. The natural convection coefficients have been exaggerated to validate that the ambient conditions will not alter the accuracy of the heat

injection measurement. Water temperature and cooling condition below the receiver are inspired from a CPV solar simulator device. Heat flux was adapted to the cooling conditions and the platform limitation.

The results are presented in Table 3.2, confirming that the temperature is uniform across the column's section, the heat loss along the column is negligible, and that large temperature differences can be achieved whereas allowing significant heat rates. It is worth noticing that the temperature difference between thermocouples is significantly larger than the thermocouples accuracy of  $\pm 1.1$  °C. These simulation results validate the proposed design of the test apparatus and suggest that good accuracy should be achievable.

Tableau 3.1 Simulation conditions

Parameter	Value	Units
Convection below the receiver (representing 1.2 l/min)	22 400	W/m <sup>2</sup> -K
Water temperature	17.5	°C
Heat flux	35	W/cm <sup>2</sup>
Ambient air	22	°C
<b>Natural convection coefficients</b>		
downward surfaces	10	W/m-K
upward surfaces	20	W/m-K
vertical surfaces	15	W/m-K

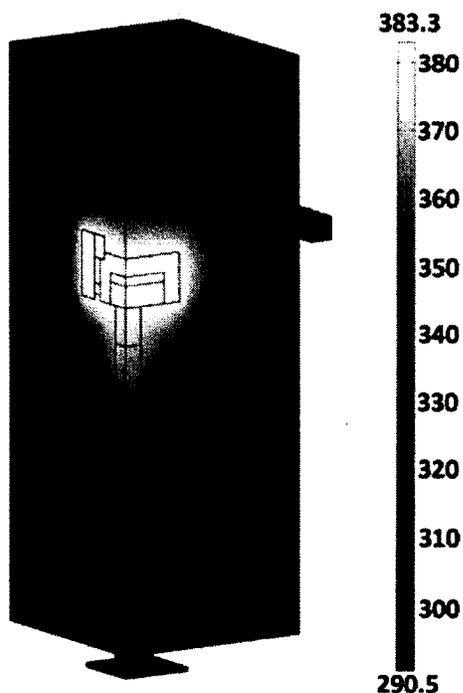


Figure 3.7 Thermal simulation of the heat injector with a receiver being tested (K).

Tableau 3.2 Heat injector performances from simulation

Parameter		Value	Units
Global heat losses (based on electrical input)		6.5	%
Temperature variation in a column's cross-section		0.01	°C
Difference in heat rate between FEM and Eq. (3)	Absolute	0.17	W
	Relative to injected heat flux	0.49	%
Heat flux losses from $T_i$ to $T_{tip}$		0.62	%
Temperature different between $T_i$ and $T_s$		58.1	°C
Heater maximum measured temperature		110	°C

## 3.6 Experimental Accuracy and Reproducibility

Before using the test apparatus for the characterization of receivers, the platform's accuracy and reproducibility will be evaluated experimentally. The most critical aspects evaluated here are the measurement uncertainties and the reproducibility of the thermal interfaces. After quantifying these aspects, reproducibility tests will be presented.

### 3.6.1 Uncertainty evaluation

The thermal resistance uncertainty results come from the measured temperatures (flow and column tip) and the heat rate, as defined in Eq. (3.5). The error on the heat rate itself, based on Eq. (3.3), is a function of the temperatures measured along the column, as well as the uncertainties on its dimensions, position of the thermocouples, and thermal conductivity. The impact of each of these parameters on the uncertainty of  $R$  is determined by taking the partial derivative of  $R$  with respect to each parameter, and summing the products of the partial derivatives with the respective parameter uncertainty. The remainder of this section details the uncertainty evaluation of the most influential parameters. For simplicity in this evaluation, the thermal conductivity will be considered constant along the column. Overall, it was found that the thermal resistance uncertainty is of  $\pm 0.15$  °C/W, for a typical measurement of 1 °C/W.

The impact of reaching steady-state operation will also be evaluated to ensure negligible error in assuming a constant heat rate along the column, as in Eq. (3.3).

#### *Temperatures for heat flux and tip's temperature calculation*

Since the heat flux is derived from the conduction along the column, heat loss and steady-

state operations are also important. Fig. 3.8 shows the thermocouple measurements along the column for a typical test, along with the expected temperature profile for a constant heat flux. They agree within the thermocouple uncertainties ( $\pm 1.1\text{ }^\circ\text{C}$ ), which confirms that the heat loss along the column is negligible and does not affect the measurement. The constant thermal conduction was also found to be appropriate for the analyzed temperature difference of  $40\text{ }^\circ\text{C}$  between  $T_1$  and  $T_5$ . The uncertainties from these temperature measurements were obtained using the minimum and maximum slopes, leading to a total of  $9.1\%$  error on a measured resistance  $R$  of  $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ , which is the most important uncertainty. By comparison, the second most important uncertainty on  $R$  (from  $k_c(T)$ ) is only of  $\pm 2\%$ , based on the norm ASTM E1225 09.

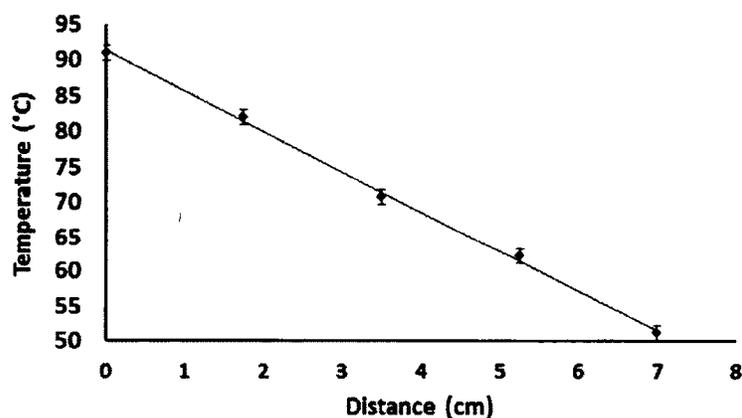


Figure 3.8 Temperature along the injection column **Line**: Linear regression (representing a constant thermal conduction) **Dots**: Thermocouple measurements.

#### *Water temperatures*

To confirm the water temperature stability, the incoming and outgoing water temperatures were monitored over  $60\text{ min}$  of steady-state operation with a set-point of  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Fig. 3.9 shows that the temperatures remain within  $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ , which represents an acceptable error of  $1.0\%$  on a typical measured difference resistance  $\Delta R_{r,g}$  of  $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ . This includes the uncertainty of the RTDs of  $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$  at this temperature.

#### *Steady-state evaluation*

The measurements can only be taken once a steady-state condition is reached in the system. As shown in Fig. 3.10, a significant stabilization time is required, mainly due to the thick insulation. This time varies with the test conditions and the sample resistance. The criterion to define a steady-state regime was chosen to be when the rate of change,  $\frac{dT}{dt_{max}}$ , is below  $0.0015\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ . The error  $Err_{rate}$  on  $\Delta R_{r,g}$  is estimated as

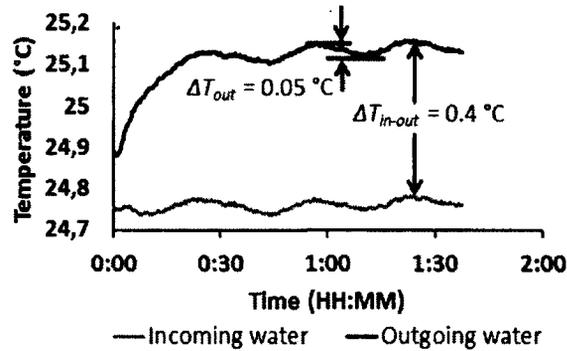


Figure 3.9 Water temperature variations during a characterization run, showing good stability.

$$Err_{rate} = \frac{mC_p}{Q} \frac{dT}{dt_{max}} \quad (3.8)$$

where  $C_p$  is the specific heat of C11000 copper alloy and  $m$  the mass of the instrumented part of the column.  $Err_{rate}$  corresponds to 0.2 % error or less, confirming that the criterion is adequate.

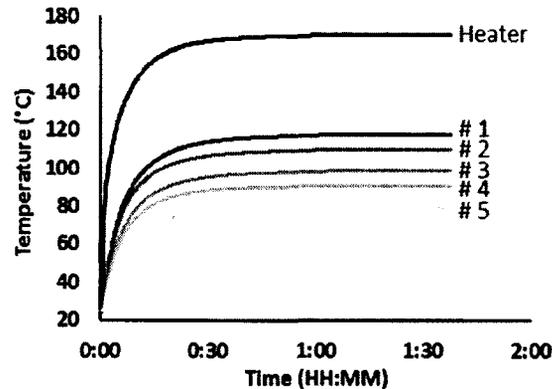


Figure 3.10 Transient thermocouple measurements until steady-state condition is achieved.

### 3.6.2 TIM Influence

Since the approach relies on differential measurements, reproducibility between tests is critical. Unfortunately, the thermal interfaces have an important contribution to the overall thermal resistance, which can vary according to the assembly procedure. Measurements with different assembly pressures have been made to understand its impact. Fig. 3.11 presents the thermal resistance for tests with different weights put on the heat injector. The column tip is resting on the heat sink with a TIM layer in between them.

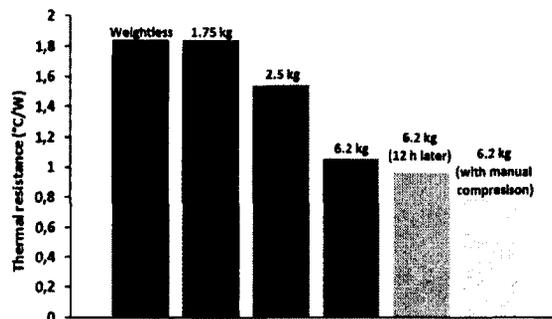


Figure 3.11 Global thermal resistance for different weight on the TIM

It can be observed that the TIM's thermal resistance is pressure dependent, so pressure should be well controlled. Minor variations can also be observed over time, suggesting that the TIM can settle during testing. Manual compression and adjustment of the parts during assembly was found to improve the reproducibility by ensuring intimate contact between the surfaces. For every test presented in this work, a 6.2 kg load with manual compression before each test was used. Also, new TIM layers were used for each test to prevent aging effects. It should be noted that this localized pressure in the center of the receiver can lead to bending of the receivers and potentially affect the pressure uniformity over the TIM. This receiver should therefore be properly supported to prevent such deformations.

Also, the pressure applied on the receiver is probably not present in an assembled CPV device. So, the performances measured with this platform should be considered as indicative values to compare receivers.

For this reason, the performances measured with this platform should be considered as relative values to compare receivers and not as the exact thermal resistance.

### 3.6.3 Reproducibility and accuracy tests

To make sure that the measurements are reproducible from one test to another, series and global characterizations were performed with simple Al and Cu metallic plates as receivers. Each test is performed 6 times to evaluate the variability, and involves removing and replacing the plates and TIMs between each test, so manipulations and TIM uncertainties are included. The experimental uncertainties are based on the largest difference observed between two measurements for each material. These tests demonstrate reproducibility within  $\pm 0.065$  °C/W. This is within the estimated measurement uncertainties ( $\pm 0.15$  °C/W), confirming that the test procedure is sufficiently well controlled.

The difference between the global and series thermal resistances can be observed from these tests. It was observed from these tests that the series resistance is systematically higher than the global resistance. Such a result confirms that the spreading effect can be isolated with this approach. Results for actual receivers will be presented and discussed in the following section.

### 3.7 Application to Receiver Testing

Four receivers of 4 cm x 4 cm are characterized to demonstrate the proposed methodology and test approach, as well as to highlight the spreading capability of different receiver geometries for CPV. They consist of a metal layer for heat spreading, with and without an alumina layer for electrical insulation (Table 3.3).

Tableau 3.3 Receivers structure composition

Receiver	Layer	Thickness	Thermal conductivity
-	-	$\mu m$	$W/m - K$
Alumina	Alumina	254	46 [13]
	Silver	20	419 [1]
Aluminum	Aluminum	780	180 [2]
Copper	Copper	780	391 [28]
Copper-alumina	Copper	780	391 [28]
	Thermal paste	Unknown	3.1
	Alumina	254	46 [13]

The impact of the receiver on the overall thermal resistance,  $R_{m,g}$  and  $\Delta R_r$ , are respectively shown in Fig. 3.12 and Fig. 3.13, with the resistance of the other components subtracted as in (3.5). Here,  $R_{c,s}$  and  $R_{c,g}$  are respectively of 1,80 and 0,79  $W/m - K$ . The global and series test results are presented along with the resulting spreading figure of merit  $S$ .

As expected, thermal spreading is a major factor in the cooling module resistance  $R_m$ . The difference between the series and global tests is in the range of 0.25 to 0.35  $^{\circ}C/W$  (Fig. 3.13) for the copper based receivers. Knowing that the measured  $R_{m,g}$  is in the range of 1  $^{\circ}C/W$ , spreading reduces the overall resistance by approximately 30 % for such configurations. On the other hand, the alumina receiver shows almost no improvement of resistance with spreading (from series to global tests), which is expected given the low thermal conductivity of alumina and very thin silver layer. This is also reflected by the spreading figure of merit,  $S$ . As expected, the receiver with the most spreading and lowest

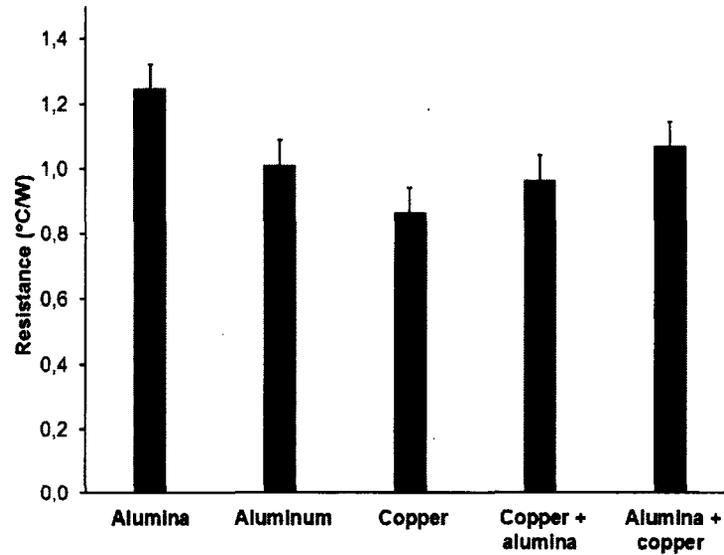


Figure 3.12 Thermal resistance of cooling modules,  $R_{m,g}$ , for global characterization

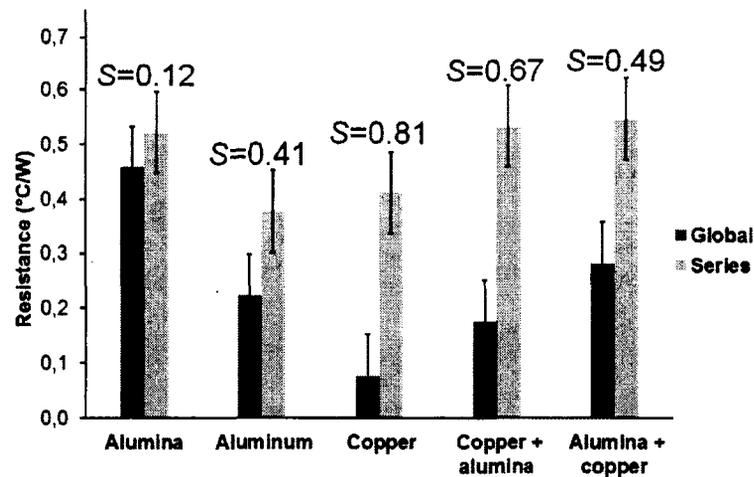


Figure 3.13 Receiver thermal resistance,  $\Delta R_r$ , for global and series characterizations.

resistance, the all-copper receiver, has the highest rating of  $S = 0.81$ . The alumina receiver, having the lowest spreading and highest resistance, gets the lowest score with  $S = 0.12$ .

Comparing the three Cu-based receivers, we notice that the addition of the alumina layer (typically required for electrical insulation) significantly increases the thermal resistance. More interestingly, the order of the layers significantly affects spreading. The difference between the Cu-alumina and alumina-Cu tests is simply that the receiver was turned up-side down. We notice first that their series resistances are identical. This symmetry

confirms that the thermal boundary conditions applied on the backside of the receiver in the series characterization are adequate to measure the normal thermal resistance without the spreading effect. However, by comparing their global resistance, we notice a difference. When the copper is on top, it spreads the heat before conducting through the alumina. This lowers the resistance of the alumina layer, allowing a greater surface for the heat flux to pass through. As shown, this leads to a lower global resistance. This confirms that spreading lowers the subsequent resistances, and that the current methodology and platform is capable of establishing the spreading capabilities of a receiver.

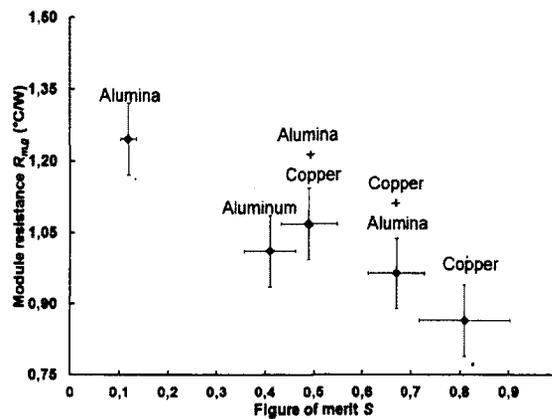


Figure 3.14 Global module thermal resistance,  $R_{m,g}$ , as a function of the figure of merit for thermal spreading,  $S$ .

Finally, the thermal resistance of the module  $R_{m,g}$  is shown in Fig. 3.14 to correlate well with the figure of merit for spreading,  $S$ . As expected, the thermal resistance decreases with the receiver's ability to rapidly spread the heat. This confirms that the experimentally defined heat spreading parameter is a relevant parameter to measure the development of low resistivity modules.

### 3.8 Conclusion

In this work, a methodology and test platform were developed to measure the thermal performance of a receiver as part of a cooling module for concentrated photovoltaics cells or high power microelectronics.

The methodology is based on measuring the thermal resistances with and without spreading in the receiver. The difference between the thermal resistances provides data on how much the receiver modifies the thermal resistance of the cooling module and how efficient the receiver can spread the heat. A figure of merit for spreading effects is introduced and found to correlate well with the observations.

A test platform was designed and realized to measure thermal resistances and to extract the spreading figure of merit. The design is based on direct heat injection into a cooling module, composed of the receiver and the heat sink. The design performances were evaluated experimentally and with numerical simulations, demonstrating sufficient accuracy and reproducibility within  $\pm 0.15$  °C/W. The platform is accurate enough to measure the spreading resistance and to distinguish most of the resistance variations from a receiver type to another. However, thermal interface resistances must be well controlled and reproducible to ensure adequate results. As some parameters (e.g. type of TIM, pressure) can differ from the utilization conditions in a CPV device, this apparatus should mostly be used to compare receivers. To extract from the apparatus the actual thermal resistance as experienced in a CPV device, care should be taken to adequately reproduce the thermal interface conditions.

The testing of various receivers has also highlighted the role of spreading on the thermal resistance for different materials and configuration. Spreading performance depends not only on material and thicknesses, but also on configuration. For example, the approach presented herein has shown that even with the same materials and thicknesses, spreading will be affected by the sequence of the layers forming the receiver.

This methodology therefore allows a consistent evaluation and comparison of CPV receivers and complete cooling modules, with heat sinks and thermal interfaces, to support their design and optimization. It can also be used to identify defective receivers and assemblies by comparing the performance with a reference device.



# CHAPITRE 4

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le but de ce projet était de développer une nouvelle méthodologie de caractérisation thermique destinée au CPV. Cette méthodologie devait permettre l'identification de critères de performance thermiques sur les structures (récepteurs et systèmes de refroidissement) destinées au refroidissement des cellules. Un second objectif était le développement d'une plateforme de caractérisation pouvant mesurer de tels critères. Ces objectifs ont tous deux été atteints.

Les modules de refroidissement analysés se composent d'un récepteur, d'interfaces thermiques et d'un système de refroidissement. Les études analytiques et expérimentales des résistances thermiques ont démontré que les résistances d'interface pouvaient être très importantes et fortement augmenter la résistance totale. De plus, il a été observé que la diffusion thermique latérale dans le récepteur permettait une diminution de la résistance dans le module par l'agrandissement de l'aire utilisée par le flux thermique. Évaluer la diffusion et la résistance thermiques fournit des informations pertinentes pour la conception de nouveaux modules de refroidissement. Or, la résistance des TIMs dans le module de refroidissement et la dissipation dans le récepteur est dépendante du module observé. La caractérisation est donc effectuée dans le contexte d'un module particulier.

La méthodologie développée a pour but de définir la dissipation thermique et l'impact résistif qu'a le récepteur dans un module. Pour y arriver, on injecte un flux thermique contrôlé et mesurable au travers du module. La résistance du module est obtenue par des calculs de résistance thermique simples en régime établi. Celle-ci est alors comparée à la même caractérisation en l'absence du récepteur. Une autre caractérisation mesure la même résistance (avec et sans récepteur), mais cette fois sans la diffusion. À l'aide de ces tests, on obtient une figure de mérite adimensionnelle permettant d'évaluer la dissipation dans le récepteur, la résistance thermique du module et l'impact résistif du récepteur.

Une plateforme a été développée pour la réalisation des mesures nécessaires à l'obtention des critères précédemment mentionnés. Elle est composée d'un injecteur de chaleur dont le flux est mesuré et contrôlé. Elle s'adapte à divers formats de récepteurs et permet l'arrimage de plusieurs types de systèmes de refroidissements, en convection naturelle ou

forcée. Un système de thermorégulation du fluide de refroidissement (pour les systèmes de refroidissement à l'eau) complète l'installation pour assurer la condition de régime établi.

Les résultats démontrent que la plateforme peut mesurer l'impact résistif et le niveau de dissipation des récepteurs dans un module. La précision de l'appareil est suffisante pour clairement observer les différentes performances en diffusion des récepteurs. Cette précision permet également une comparaison des impacts résistifs des récepteurs (avec leur dissipation) sur les modules. L'une des grandes sources d'incertitude provient des interfaces thermiques qui sont fortement influencées par la pression appliquée sur eux. La méthode appliquée pour caractériser les modules de refroidissement utilise des mesures différentielles avec différentes conditions frontières thermiques. La soustraction des résistances entre ces conditions avait pour conséquence de n'inclure qu'un seul TIM dans la résistance du récepteur, augmentant l'effet du récepteur sur la mesure de la résistance du module.

La réalisation d'une telle méthodologie de caractérisation, incluant sa plateforme, se révèle être un outil intéressant pour la conception de récepteurs. Ce type de caractérisation n'ayant pas besoin d'une cellule pour être utilisé, il peut être appliqué très tôt dans la conception des récepteurs. De plus, les concepteurs pourront mieux évaluer les combinaisons de récepteurs avec les autres éléments des modules et ainsi choisir ces composantes en conséquence. Enfin, la plateforme a été développée dans un contexte d'outil de développement pour le CPV. Or, d'autres domaines, tels que l'encapsulation de puces électroniques (*electronic packaging*), se trouvent confrontés à des problématiques thermiques similaires et pourraient ainsi bénéficier d'un tel outil.

### **Travaux futurs**

Ce travail trace la voie à la caractérisation de modules de refroidissement pour CPV, qui serait la première étape majeure de nouveaux travaux. La caractérisation de modules de différentes natures, soit commerciaux ou expérimentaux, validerait l'applicabilité, la versatilité et le potentiel de la méthode et de la plateforme développées. Quant aux données recueillies, elles pourraient être appliquées pour développement de nouveaux modules.

Une seconde phase serait le développement de nouvelles aires de section d'injection afin de réaliser des caractérisations représentant plusieurs dimensions de cellules. Les modules destinés aux dimensions de cellules autres que la cellule  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  présentée dans ce travail pourraient alors être caractérisés selon des conditions mieux adaptées à ces derniers.

Le domaine de la microélectronique contient des défis de refroidissement similaires au CPV. Il semblerait que l'essence de ce travail soit applicable à la caractérisation de boîtiers de puces électroniques. Un tel outil fournirait un important support à la validation de

nouveaux concepts de boîtiers, permettant ainsi de faire face aux contraintes thermiques des puces.

Enfin, dans le but d'améliorer les performances, la fonctionnalité et la sécurité du montage, la sous-section suivante présente des améliorations techniques liées à la plateforme. Elles devraient donc être envisagées avant la poursuite des caractérisations.

### **Recommandations**

Cette section présente les recommandations pour l'amélioration de la plateforme. Ces améliorations ont pour but d'augmenter son exactitude et sa précision, d'élargir ses possibilités de caractérisation, d'améliorer sa sécurité ou de faciliter les manipulations. Pour améliorer l'exactitude de la plateforme, les recommandations sont :

- Remplacer les thermocouples de type "T" le long de la colonne d'injection par des RTDs de haute précision.
- Réusinier la colonne d'injection pour obtenir des tolérances plus serrées, notamment pour la planarité et le fini de surface du bout de la colonne, ainsi que de l'uniformité des trous pour les thermocouples.

Pour améliorer la précision, les recommandations sont :

- Utiliser un TIM ayant des performances exceptionnelles pour retrouver sa forme après déformation.
- Solidifier les glissières pour assurer un bon contact grâce au parallélisme entre la surface de la colonne et de l'échantillon.
- Utiliser un débit d'eau de refroidissement plus important avec une eau plus froide et avec un flux thermique plus important. Cela, afin d'assurer une plus grande uniformité de la température de l'eau.
- Fixer le RTD de surface mesurant la température de l'extrémité de la colonne d'injection. Cette valeur pourra ensuite être comparée avec la valeur extrapolée.

Pour augmenter la sécurité pour l'opération de la plateforme :

- Installer un bassin de rétention sous le système de circulation d'eau pour contenir une potentielle fuite.
- Installer une alarme en cas de surchauffe de l'élément chauffant.

Enfin, pour faciliter les manipulations, les recommandations sont :

- Développer un outil permettant un centrage facile des échantillons.

# ANNEXE A

## MÉTHODOLOGIE DE CARACTÉRISATION

Le présent annexe explique la méthodologie développée pour caractériser les modules de refroidissement, incluant le récepteur. Une partie importante de la section 3.4 de l'article est répétée dans cette annexe afin de mettre en contexte les éléments complémentaires à l'article et ainsi, mieux décrire la méthodologie employée.

### A.1 Contexte

Une étude des fonctions que doit remplir la plateforme de caractérisation est réalisée et présentée au tableau A.1. La plateforme de caractérisation doit également tenir compte des difficultés suivantes ;

#### 1- La faible résistance thermique du récepteur

Pour être considérés, les récepteurs doivent posséder des résistances thermiques aux environs de 1 W/K, tel que précisé au chapitre 1. La mesure d'une telle résistance nécessite un montage ayant une précision au-delà de  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

#### 2- La diffusion thermique du récepteur

Contrairement aux problèmes thermiques en 1D, le récepteur ne conduit pas la chaleur selon un seul axe transversal, mais la diffuse également. Ainsi, les approches unidimensionnelles ne permettent pas de caractériser le récepteur et des méthodes alternatives doivent être prises pour calculer sa performance.

#### 3- L'interrelation entre le récepteur et le système de refroidissement

Un effet de couplage existe entre le récepteur et le système de refroidissement. Celui-ci devient évident lorsque le nombre de Biot entre le récepteur et le système de refroidissement est inférieur à 10 (voir la section 3.3). Obtenir un refroidissement suffisant pour remplir cette condition est difficilement réalisable. Il est donc nécessaire d'inclure le système de refroidissement dans la caractérisation du récepteur.

#### 4- La variété des formes et technologies des récepteurs

Il faut comparer les récepteurs avec des critères qui ne sont pas affectés par les différentes géométries qu'ils possèdent. Ces critères doivent reposer exclusivement sur la performance à évacuer la chaleur de la cellule. La résistance thermique a été retenue comme étant la base des critères de performance.

Tableau A.1 Critères de conception de la plateforme de caractérisation

	Fonction	Justification
1	Accueillir des récepteurs de différentes tailles	Comparer les différents modèles développés.
2	Mesurer un(des) critère(s) de performance permettant une comparaison adéquate entre les récepteurs	Être en mesure de sélectionner les modules les plus performants et adaptés aux conditions.
3	Conserver le récepteur en bon état	Le récepteur doit être intact après les tests, pour être testé à nouveau ou pour toute autre raison.
4	Fournir les conditions aux limites contrôlées (refroidissement, injection de chaleur, quantification de l'isolation)	Permettre une caractérisation contrôlée.
5	Être simple et rapide d'utilisation	Fournir rapidement une valeur et réduire le risque d'erreur.

## A.2 Approche générale

La méthode retenue pour caractériser l'impact résistif des récepteurs à l'intérieur d'un module de refroidissement est de lui appliquer un flux thermique. Ce flux traverse le récepteur à caractériser et est ensuite évacué par un système de refroidissement. Cette section traite des conditions aux limites et des composantes nécessaires pour réaliser une telle méthode.

### A.2.1 Conditions aux limites

La performance du récepteur est liée à la résistance thermique d'un flux de chaleur traversant son épaisseur (résistance en série) et à la diffusion de ce flux sur sa largeur (résistance parallèle). Donc, deux types de tests doivent être retenus pour connaître la performance d'un récepteur. Dans un premier cas, on mesure la résistance dite *en série* du récepteur. On utilise donc des conditions aux limites permettant au flux thermique un parcours unidirectionnel au travers l'épaisseur du récepteur. Ce test est présenté à la figure A.1. Le refroidissement est présent uniquement sous l'aire d'injection de la cellule. Il doit être suffisamment agressif pour permettre un flux adéquat au travers du module de refroidissement.

Le second test, nommé caractérisation globale, caractérise le module de refroidissement lorsque les résistances en série et en parallèle du récepteur sont combinées. Ce test est présenté à la figure A.2. Il permet également d'obtenir la résistance du module de refroidissement.

Avec ces deux scénarios, il est possible de connaître la contribution de la diffusion dans le récepteur. La procédure, ainsi que les critères de performance, sont présentés à la sous-section A.3.

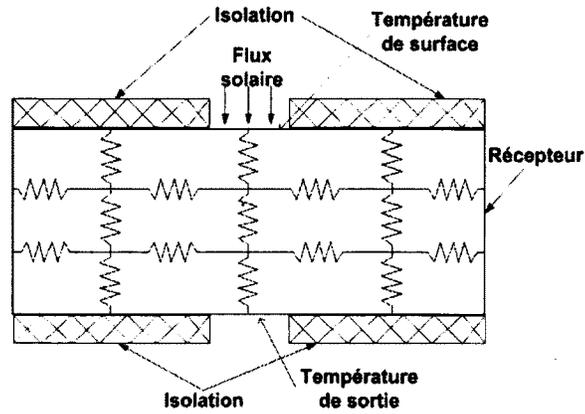


Figure A.1 Caractérisation de la résistance thermique en série du récepteur

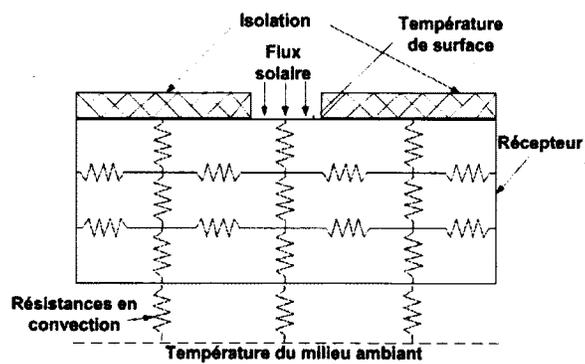


Figure A.2 Caractérisation de la résistance thermique globale du récepteur

## A.2.2 Injecteur de flux thermique

L'injecteur de chaleur doit fournir un flux thermique contrôlé et mesuré au module de refroidissement. Ce flux doit être injecté sur une surface équivalente à l'aire de la cellule afin de tester les performances du module sous des conditions similaires à son utilisation. L'approche retenue utilise un élément chauffant avec une colonne instrumentée à haute conduction et entourée d'un isolant. Une schématisation du montage est présentée à la figure A.3.

Le principe est de générer un flux thermique à l'aide de l'élément chauffant. Ensuite, on dirige le flux thermique dans une direction prédéfinie. Cette direction est créée par la différence de conductivité entre l'isolant, qui est très faible, et la colonne d'injection qui possède un coefficient de conduction élevé. Le flux arrivant au récepteur est alors calculé par des mesures de température à des points connus sur la colonne, ainsi qu'avec les valeurs de son aire et sa conductivité.

## A.3 Méthode de mesure

La résistance globale étant toujours inférieure ou égale à la résistance en série, on notera que plus cette différence est importante, plus la contribution de la résistance en parallèle est faible. À l'inverse, une faible différence indique une forte résistance à la diffusion. On calculera à partir de ces résistances mesurées, la figure de mérite  $S$  tel que décrite au chapitre 3. Les sous-sections suivantes décrivent comment obtenir les résistances en série  $\Delta R_{r,s}$  et globale  $\Delta R_{r,g}$ .

### A.3.1 Résistance thermique globale

On débute en caractérisant la résistance globale tel que présentée à la figure A.2. On génère un flux de chaleur pour simuler la chaleur provenant normalement de la cellule. On injecte un flux thermique contrôlé et mesuré sur la zone où la cellule est normalement posée sur le récepteur. Le système de refroidissement vient ensuite récupérer le flux thermique sous

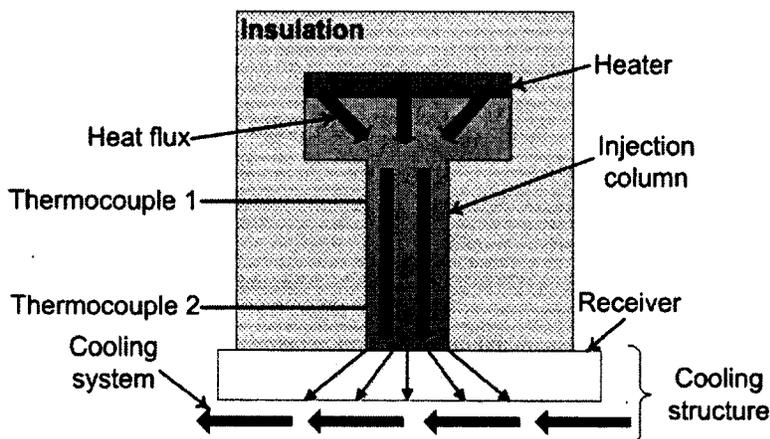


Figure A.3 Schéma de l'injecteur de chaleur avec parcours du flux thermique

le récepteur pour l'évacuer dans l'environnement ou dans un fluide de refroidissement. À l'exception de la surface d'injection et du système de refroidissement, les autres surfaces doivent être isolées afin d'éviter les fuites thermiques.

### Caractérisation globale à vide

Pour trouver l'impact de la résistance d'un récepteur sur l'ensemble du module de refroidissement, on doit d'abord connaître la résistance du parcours thermique du montage sans récepteur, appelé ici caractérisation globale "à vide". On positionne donc la colonne d'injection directement sur le système de refroidissement, tel que présenté à la figure A.4 (a). Les parois verticales de la colonne sont isolées thermiquement et des thermocouples sont positionnés à une distance  $l_{a-b}$  sur la colonne, où  $a$  et  $b$  sont des positions de thermocouples. L'aire  $A$  de cette colonne est constante. Un TIM est utilisé afin de réduire et normaliser la résistance thermique créée à l'interface entre l'extrémité de la colonne et le système de refroidissement. La conductivité de la colonne  $k_c(T)$  est également connue et est considérée variable en fonction de la température. Il est alors possible de déterminer le flux  $\dot{Q}$  à partir de ces informations pour des températures  $T_a$  et  $T_b$  prédéfinies par l'équation :

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \int_{T_b}^{T_a} \frac{k_c(T)A}{l_{a-b}} dT \\ &= \frac{A}{l_{a-b}} \int_{T_b}^{T_a} k_c(T) dT\end{aligned}\tag{A.1}$$

On suppose que la totalité du flux passant dans la colonne traverse le récepteur pour être ensuite évacué par le système de refroidissement. On extrapole alors la température à l'extrémité  $T_{ext}$  de la colonne en contact avec le récepteur. Pour cela, on résout l'équation A.1 en remplaçant la borne  $b$  par  $T_{ext}$  et en utilisant la distance  $l_{a-ext}$ , soit entre le point  $a$  et l'extrémité de la colonne d'injection. En connaissant la température du fluide (ou de l'environnement), nommée  $T_\infty$ , on trouve la résistance  $R_{c,g}$  entre le fluide et  $T_{ext}$  par l'équation :

$$R_{c,g} = \frac{T_{ext} - T_\infty}{\dot{Q}}\tag{A.2}$$

Ainsi,  $R_{c,g}$  représente la résistance du montage sans récepteur. On remarque qu'il comprend cependant la résistance du TIM entre l'injecteur et le système de refroidissement.

### Caractérisation globale avec récepteur

L'étape suivante est de mesurer la résistance thermique avec un récepteur installé entre le système de refroidissement et l'extrémité de la colonne. Cette mesure est nommée caractérisation globale avec récepteur. Ce montage est présenté à la figure A.4 (b). On y calcule le flux thermique  $\dot{Q}$  à l'aide de l'équation A.1. On détermine ensuite  $R_{m,g}$  à l'aide de l'équation A.2 en remplaçant  $R_{c,g}$  par  $R_{m,g}$ .

### Résistance globale

On détermine enfin la variation de la résistance thermique globale  $\Delta R_{r,g}$  en soustrayant la

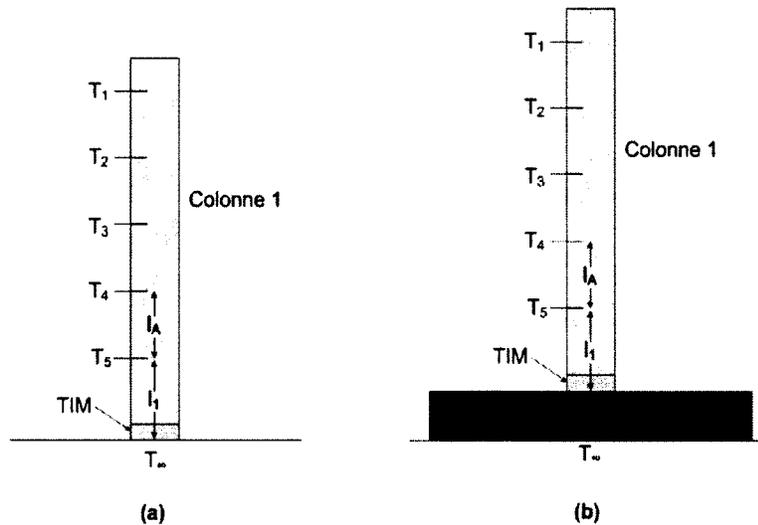


Figure A.4 Injection d'un flux thermique contrôlé pour la caractérisation globale à vide (a), Injection d'un flux thermique contrôlé pour la caractérisation globale avec récepteur (b)

résistance du montage à celle du montage avec récepteur lors de la première caractérisation. On obtient alors :

$$\Delta R_{r,g} = R_{m,g} - R_{c,g} \quad (\text{A.3})$$

Une valeur négative signifie que la présence du récepteur réduit la résistance du module de refroidissement. Ainsi, les résistances liées au récepteur ( $R_{rec 1}$  et  $R_{TIM}$ ) sont plus petites que la diminution de la résistance dans le système de refroidissement, créée par l'élargissement de l'aire du flux thermique entrant. Au contraire, une valeur positive signifie que l'ajout du récepteur augmente la résistance du module. Dans ces cas, la diffusion thermique ne compense donc pas complètement la couche et l'interface résistifs ajoutés.

Un impact résistif négatif signifie alors que l'effet de la diffusion est plus important que la résistance en série lorsque le récepteur est ajouté au réseau de résistances du module de refroidissement.

Ainsi, le flux peut se répartir sur une plus grande surface et réduire son parcours résistif dans le reste du module. La variable  $\Delta R_{r,g}$  représente l'ensemble de l'impact résistif du récepteur, incluant le TIM entre le récepteur et le système de refroidissement. Le TIM entre la colonne et le récepteur est quant à lui retranché par la caractérisation globale "à vide".

### A.3.2 Résistance thermique en série

Pour la résistance thermique en série, on cherche à ne refroidir que le récepteur sur une surface égale à la surface de la cellule et directement sous l'aire d'injection. Pour réaliser ce montage, une seconde colonne d'injection est ajoutée entre le récepteur et le système

de refroidissement. Un TIM est ajouté à l'interface thermique supplémentaire. Or, l'ajout d'une section de colonne et d'une interface thermique modifie la résistance thermique du module de refroidissement. Il est donc nécessaire de performer une autre caractérisation "à vide" adaptée au test en série. La figure A.5 (a) illustre le montage utilisé pour trouver cette résistance.

On calcule le flux thermique  $R_{m,s}$  à l'aide de l'équation A.1. La résistance thermique "à vide"  $R_{c,s}$  peut alors être calculée par l'équation A.2.

On fait ensuite passer un flux thermique de façon unidirectionnelle au travers du récepteur. La figure A.5 (b) présente un tel montage.

On détermine enfin la résistance thermique en série  $\Delta R_{r,s}$  en soustrayant la résistance du montage à celle du montage avec récepteur lors de la seconde caractérisation. On obtient alors :

$$\Delta R_{r,s} = R_{m,s} - R_{c,s} \quad (\text{A.4})$$

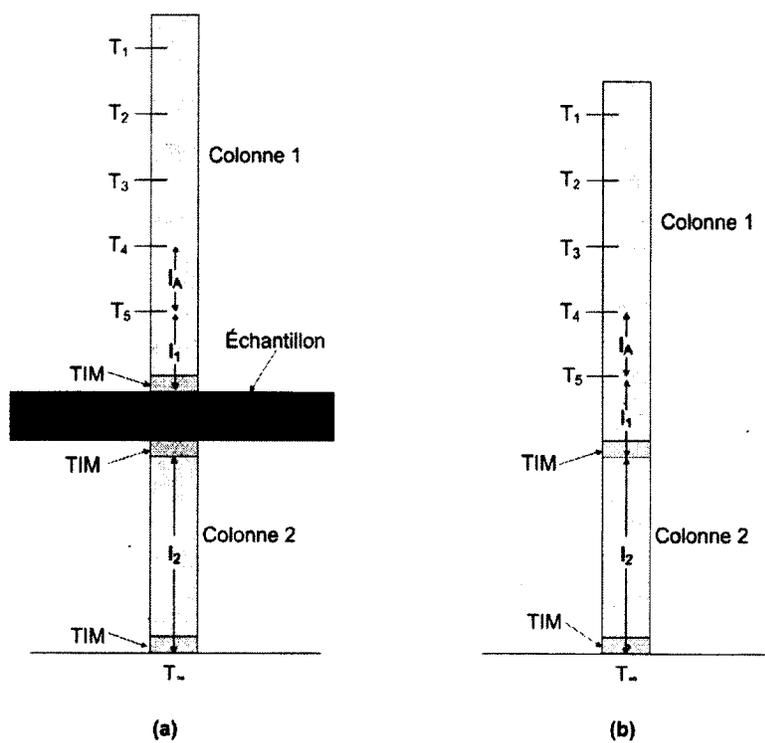


Figure A.5 Injection d'un flux thermique contrôlé pour la caractérisation série avec récepteur (a), Injection d'un flux thermique contrôlé pour la caractérisation série "à vide" (b)

# ANNEXE B

## CONCEPTION

Cette annexe traite des critères de dimensionnement du montage, des fonctions et interrelations entre les sous-ensembles, ainsi que des matériaux retenus pour la fabrication. Une conception assistée par ordinateur (CAO) a été réalisée selon la méthodologie présentée à l'annexe A. Tout comme l'annexe A, une partie importante de la section 3.5 de l'article est répétée dans cette annexe afin de mettre en contexte les éléments complémentaires à l'article et ainsi, mieux décrire la conception de la plateforme de caractérisation.

### B.1 Critères de conception

Un ensemble de critères a été utilisé pour le dimensionnement et les choix de matériaux. Ces critères sont présentés dans cette section.

#### B.1.1 Aire d'injection

Les cellules à triple jonctions se présentent sous différentes grandeurs. Pour les besoins de la plateforme, une aire de 1 cm x 1 cm est choisie pour représenter une aire généralement rencontrée dans le CPV. Fixer une aire d'injection permet de mesurer l'ensemble des modules de refroidissement à partir d'une condition invariable.

#### B.1.2 Génération d'un flux thermique

Trois technologies ont été retenues pour générer un flux thermique sur le récepteur, soit le laser, une lumière concentrée et un élément chauffant. Une puissance minimale de 20 W est posée pour permettre des lectures de températures avec des différences significatives.

Le laser a l'avantage de fournir directement le rayonnement nécessaire pour générer le flux thermique nécessaire sur le récepteur. Or, ce laser doit fournir environ 20 W pour générer une différence de température suffisante pour calculer la résistance thermique du récepteur. Une connaissance de la réflectivité de chaque surface d'injection est nécessaire afin de définir le flux thermique réel qui est introduit dans le récepteur. La distribution du laser sur la surface injectée doit également être uniforme à l'aide d'une lentille divergente.

Utiliser la lumière concentrée possède sensiblement les mêmes avantages et inconvénients que le laser. Ils se différencient par le fait que la lentille doit être convergente dans le cas de la lumière concentrée.

Pour l'élément chauffant, ses principaux avantages sont qu'il ne nécessite pas la connaissance de la réflectivité sur la surface injectée, qu'un flux élevé peut facilement être généré par des éléments chauffants commerciaux (Voir brochure Ultramic<sup>TM</sup> à l'annexe F) et

qu'un tel flux peut facilement être homogène. Une forte isolation, un médium d'injection calibrant le flux injecté et un TIM entre ce médium et le récepteur sont également nécessaires. C'est cette solution qui a été retenue.

### B.1.3 Colonne d'injection

La colonne d'injection possède trois rôles, soit :

- Transporter le flux thermique de l'élément chauffant à l'aire d'injection.
- Adapter la géométrie de l'élément chauffant à celle de l'aire d'injection.
- Offrir un gradient de température permettant la mesure d'un flux thermique unidirectionnel. (Le calcul du flux thermique est présenté à l'annexe A)

#### Matériau

Le cuivre a été retenu comme matériau pour réaliser cette colonne car il a les qualités suivantes :

- Forte conductivité thermique  
Par sa grande conductivité, le cuivre favorise le passage du flux thermique à l'intérieur de la colonne. Cela limite donc les pertes thermiques le long de la colonne et permet un flux unidirectionnel. La forte conduction permet l'utilisation d'une longue colonne sans trop restreindre la puissance de l'élément chauffant avant qu'il n'atteigne sa température limite d'utilisation.
- Température de fusion élevée  
La température de fusion du cuivre est généralement supérieure à 1000 °C. Elle ne limite donc pas l'usage d'un flux élevé.
- Bonne usinabilité  
La colonne d'injection doit avoir une précision géométrique élevée, le cuivre est un matériau suffisamment usinable avec une bonne précision.

Cependant, le cuivre possède un principal inconvénient, soit sa conductivité thermique qui varie appréciablement en fonction de la température. Cela implique donc une méthode de calcul du flux thermique incluant cette variation (présentée à la section D.1).

#### Géométrie

Comme la surface de l'élément chauffant n'est pas la même que celle de l'aire d'injection, la colonne est divisée en trois sections, soit une section large qui correspond à la surface de l'élément chauffant, une section mince qui correspond à l'aire d'injection et une section de transition. Une autre zone importante est l'emplacement des capteurs de température afin de mesurer le flux thermique. Ces zones sont définies dans cette sous-section.

#### *Changement de section*

Le changement de section provoque un gradient de température appréciable et réduit la plage du flux thermique applicable. Afin de le minimiser, une section de transition avec un

angle variable est étudiée et présentée à la figure B.1. Ces angles sont référés par rapport à la verticale. Les sections large et mince sont conservées constantes.

On y remarque que plus l'angle est faible (transition douce), plus la température maximale est élevée pour un même flux. Cela signifie donc que l'ajout d'une résistance provoquée par une plus haute colonne d'injection est plus important que la résistance de transition pour un changement de section brusque.

Seuls quelques angles ont été observés et il serait possible que pour certains angles, il y ait un gain à réduire progressivement la section. Cependant, n'ayant pu obtenir d'amélioration par le changement d'angle, un angle de 90° a été retenu.

#### *Hauteur de section large*

La longueur et la largeur de la section supérieure sont déterminées par les dimensions de l'élément chauffant, soit 25 mm X 15 mm. Quant à la hauteur, elle est déterminée par simulation numérique. La hauteur permettant la plus basse température maximale dans la simulation est celle retenue. Cela permet ainsi à l'élément chauffant de fournir un flux thermique supérieur avant d'être limité par sa température maximale d'opération. Les résultats sont présentés au tableau B.1.

On remarque que pour les épaisseurs de 1 mm à 6 mm, la température descend. Cela est attribuable à la création d'un chemin thermique pour la chaleur générée dans les extrémités de l'élément chauffant. Une section supérieure d'épaisseur nulle obligerait la chaleur générée à être évacuée par l'élément chauffant avant de pouvoir rejoindre la section de colonne inférieure et, ultimement, le système de refroidissement. La colonne de cuivre, plus conductrice thermiquement que l'élément chauffant, combiné à l'épaisseur de la section supérieure réduit donc la résistance du passage de la chaleur jusqu'au refroidisseur observée dans la première section du tableau B.1.

Cependant, l'augmentation de l'épaisseur de la section supérieure de la colonne contribue graduellement moins significativement à l'évacuation de la chaleur de la périphérie de l'élément chauffant. La résistance thermique dans l'axe de l'épaisseur augmente quant à elle linéairement avec l'augmentation de l'épaisseur. Il arrive donc une épaisseur à laquelle l'agrandissement des chemins thermiques pour les zones périphériques de l'élément

Tableau B.1 Température maximale de la colonne d'injection en fonction de l'épaisseur de la section supérieure

<b>Hauteur de section supérieure</b>	<b>Température maximale</b>
<b>mm</b>	<b>K</b>
1	844.5
2	801.8
4	784.5
5	782.4
6	781.9
7	782.2
10	785.8

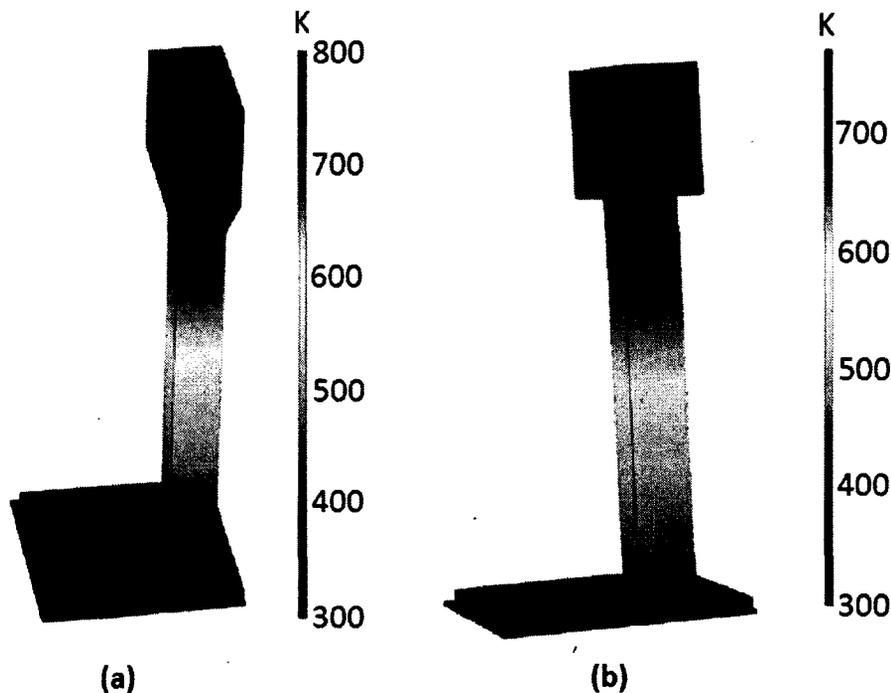


Figure B.1 Simulation d'une injection de chaleur avec un flux thermique constant et une température de refroidissement de 300 K (Gauche) Zone de transition à 60° par rapport à la hauteur de la colonne (Droite) Zone de transition à 90° par rapport à la hauteur de la colonne

chauffant contribue moins à réduire la résistance thermique que la résistance créée dans l'axe de l'épaisseur. C'est pourquoi on remarque une remontée de la température dans le tableau B.1 pour les épaisseurs de plus de 6 mm.

Les conditions de la simulation sont les suivantes :

- Concentration : 1000X
- Matériau colonne d'injection : cuivre C11000 ( $k \cong 386 \frac{W}{m \cdot K}$ )
- Section inférieure : 5 mm X 10 mm X 10 cm
- Refroidissement :  $4500 \frac{W}{m^2}$

Ainsi, l'épaisseur qui minimise la température maximale est de 6 mm. C'est donc la hauteur qui est utilisée pour la section supérieure.

#### *Hauteur de section mince*

Pour la section inférieure, les côtés de la section sont fixés par la taille d'une cellule solaire de 1 cm X 1 cm. Il ne reste donc plus qu'à déterminer la hauteur de la section. Idéalement, une section «aussi grande que possible» est souhaitée. Les raisons sont :

- L'incertitude relative sur la mesure entre les positions des capteurs est plus petite.
- L'incertitude relative aux mesures des capteurs de température est plus petite.

- Les capteurs de températures peuvent être installés plus loin des extrémités, permettant une mesure où les sections de la colonne sont à des températures plus uniformes. Il devient possible de mesurer le flux thermique uniquement avec des capteurs à la surface de la section. Cela permet d'éviter de perturber le flux en introduisant des capteurs à l'intérieur de la section.

Cependant, il y a les inconvénients suivants à utiliser une hauteur plus élevée :

- Augmentation des pertes thermiques au travers de l'isolation ;
- Réduction du flux maximal d'opération pour une température maximale donnée de l'élément chauffant.

La hauteur de la section inférieure a été fixée à 10 cm de hauteur. Cette dernière permet une différence de température d'approximativement 77 °C entre les deux extrémités de cette section pour un flux de 30 W et une conductivité approximative de  $390 \frac{W}{m \cdot K}$ . Si la conductivité est moindre, cet écart sera plus élevé.

#### *Emplacement des capteurs*

L'emplacement et le nombre de capteurs thermiques sont régis par les éléments suivants :

- Éviter les effets de bout.
- Être suffisamment distancés pour obtenir des différences de température significatives.
- Être suffisamment nombreux pour confirmer le profil de conductivité du cuivre et le parcours unidirectionnel du flux.
- Ne pas être trop nombreux ou trop gros pour éviter les pertes thermiques par les capteurs.
- Mesurer une température représentative de la section de colonne.

Pour positionner les capteurs thermiques, il faut connaître la distribution de température aux environs de la zone à instrumenter. Pour connaître cette distribution de température, une simulation de la colonne d'injection est réalisée. La convection naturelle autour de l'injecteur est négligée et aucun capteur n'y est simulé. La colonne d'injection possède des hauteurs de section inférieure et supérieure de respectivement 10 cm et 0,6 cm. Le refroidissement sous le récepteur est posé à  $4500 \frac{W}{K \cdot m^2}$ . Quant à la conductivité de la colonne d'injection, elle est de  $365.9 \frac{W}{m \cdot K}$  d'après la température maximale mesurée au tableau B.2. Le tableau B.2 décrit les écarts de températures et les températures maximales pour différentes sections de la partie inférieure de la colonne d'injection. La position à 0 cm correspond à l'extrémité de la colonne en contact avec le système de refroidissement, alors que la position à 10 cm correspond à la jonction entre la section inférieure et supérieure.

Un nombre de cinq capteurs thermiques a été retenu. Pour cela, des trous cylindriques de 1 mm de profondeur à une distance de 17.5 mm entre chacun d'eux ont été réalisés. Le premier capteur est installé à une distance de 10 mm du bas de la colonne.

Tableau B.2 Différence de température maximale au travers d'une section transversale de la partie inférieure de la colonne en fonction de la hauteur de section

Hauteur de la section	$\Delta T$ de la section	$T_{max}$
cm	K	K
0.2	5.2	-
0.5	0.4	-
1	0.4	482.7
2	0.7	516.3
3	1	550
4	1.4	583.7
5	1.7	617.3
6	2.1	651
7	2.4	684.6
8	2.7	718.3
9	3.5	752.1

### B.1.4 Système de support

Le système de support est la structure permettant de suspendre la colonne d'injection et l'élément chauffant au-dessus de la structure à caractériser. Ce système doit avoir les caractéristiques suivantes :

- *Avoir une température de fusion supérieure à 850 K.*  
Le système de support est directement en contact avec l'élément chauffant. Il faut que ce système demeure fonctionnel même lorsque cette température est atteinte (température au-dessus de la température limite des terminaux de l'élément chauffant).
- *Être inerte aux températures de service*  
Puisque le matériau utilisé sera soumis à des températures pouvant avoisiner les 850 K, le matériau ne doit pas réagir avec son environnement, notamment ne pas créer d'oxydation.
- *Être suffisamment rigide pour que l'extrémité de la colonne soit considérée fixe.*  
Permettre à la colonne d'être parallèle au récepteur et d'être alignée avec la colonne amovible.
- *Posséder un faible coefficient de conduction.*  
Minimiser les pertes thermiques hors de la colonne d'injection.
- *Être usinable avec une bonne précision.*  
Limiter le jeu entre les pièces. Cela permet un bon alignement entre l'élément chauffant et la colonne d'injection, ainsi qu'un bon alignement de la colonne sur le centre de la structure à refroidir.

- *Être mobile dans l'axe de la colonne.*

Appuyer la colonne sur des modules de refroidissement de différentes hauteurs.

Pour réaliser le déplacement dans l'axe de la colonne, un système de glissières a été retenu. Sur ce système, une pièce permet de fixer l'élément chauffant et la colonne d'injection tout en garantissant un bon alignement de la colonne. Pour minimiser les pertes thermiques avec l'environnement, le support est relié aux glissières par des petites barres rigides.

L'acier inoxydable a été retenu comme matériau pour toute la structure de support. Ses aptitudes à être inerte dans un environnement avec de l'air et à ne fondre qu'à des températures largement au-dessus de 850 K (soit aux environs de 1600 K) lui permettent d'être exposé à la chaleur de l'élément chauffant. De plus, comme tout acier, il possède une bonne rigidité. Enfin, c'est un matériau relativement facile à usiner.

### B.1.5 Colonne amovible

Pour la caractérisation en série, il est nécessaire d'ajouter une section de colonne amovible au montage de base. Cette colonne est le prolongement de la colonne d'injection principale et doit posséder les mêmes caractéristiques que celles présentées à la sous-section B.1.3.

La principale différence est qu'il faut conserver une section constante. De plus, comme cette section ne doit pas être instrumentée, elle peut être considérablement plus courte. Enfin, sa position dans le montage ne permet pas un moyen de fixation comme celui de la colonne principale. Une rainure près de son extrémité où elle est en contact avec le système de refroidissement sert de moyen de fixation à l'aide d'un boîtier mobile. Le boîtier mobile est l'élément qui rattache la colonne d'injection mobile aux glissières, en plus de contenir l'isolant.

## B.2 Concept global

Le concept global est présenté à la figure B.2. On y remarque la localisation approximative des différents sous-ensembles.

## B.3 Sous-ensembles

Pour décrire le montage de la figure B.2, il est préférable de l'expliquer selon ses sous-ensembles. Ceux-ci sont en fait un regroupement de pièces ayant des fonctions communes.

### B.3.1 Base

La base du montage, présentée à la figure B.3, est l'ensemble des pièces qui supportent le boîtier et le refroidisseur. L'ensemble des pièces est composé d'acier, à l'exception des pièces touchant au refroidisseur, qui sont en polymère. Des glissières fixent le boîtier en permettant son ajustement selon un axe parallèle à la hauteur de la colonne d'injection. Cette glissière sert également à installer la colonne d'injection amovible, tout en permettant le

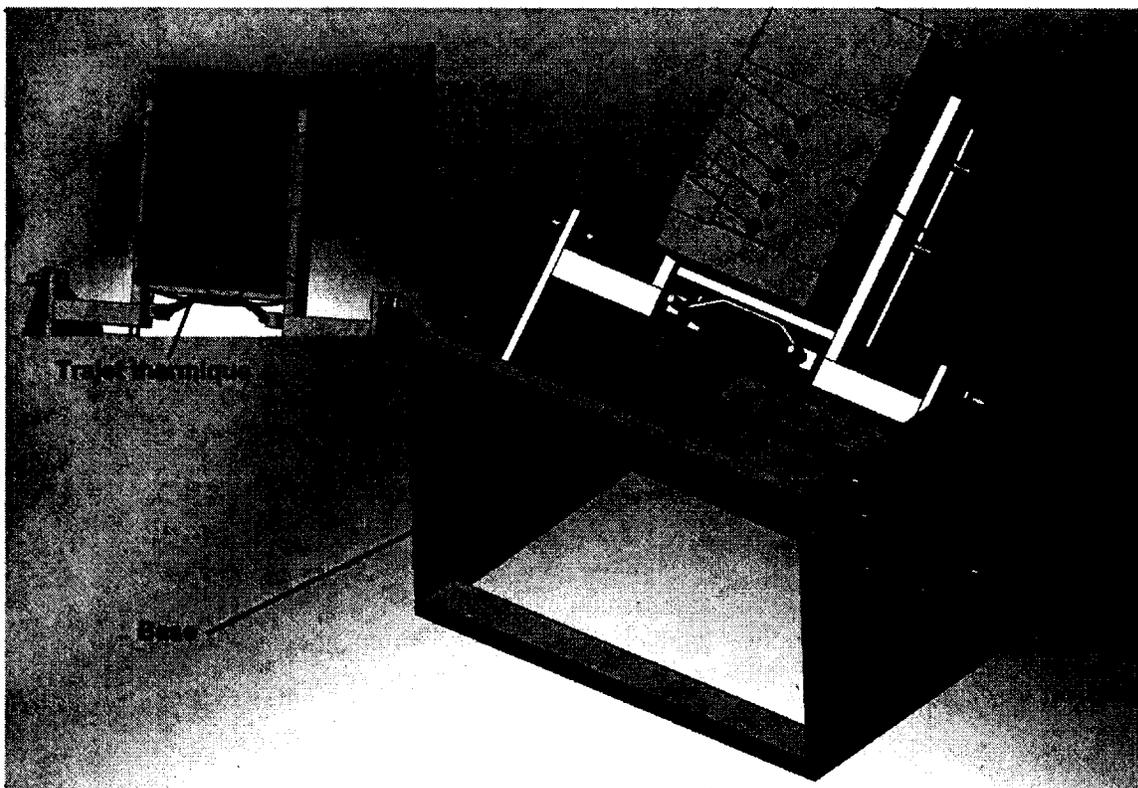


Figure B.2 Concept global de la plateforme de caractérisation

même déplacement. La base permet l'inclinaison de la plateforme dans le cas où le système de refroidissement utilisé dépend de l'inclinaison par rapport à la gravité (ex : convection naturelle). Enfin, des pattes sont conçues pour fixer le système de refroidissement.

### B.3.2 Système de support

Le concept du système de support est présenté à la figure B.4. Le capuchon sert d'encavure à l'élément chauffant et à la colonne d'injection. Aussi, les blocs-glissières sont destinés à coulisser dans les glissières (présentées à la figure B.3) de la base. Enfin, le pont est un compromis entre les fonctions de fournir une rigidité au montage et de minimiser les pertes de chaleur en utilisant une quantité minimale de matière. Toutes les pièces de ce montage sont en acier inoxydable.

### B.3.3 Trajet thermique

L'ensemble du trajet thermique essentiel pour la caractérisation des modules de refroidissement est présentée à la figure B.5. Les composantes telles que l'élément chauffant et le refroidisseur sont achetés commercialement et les autres composantes sont fabriquées. Les colonnes du montage sont en cuivre.

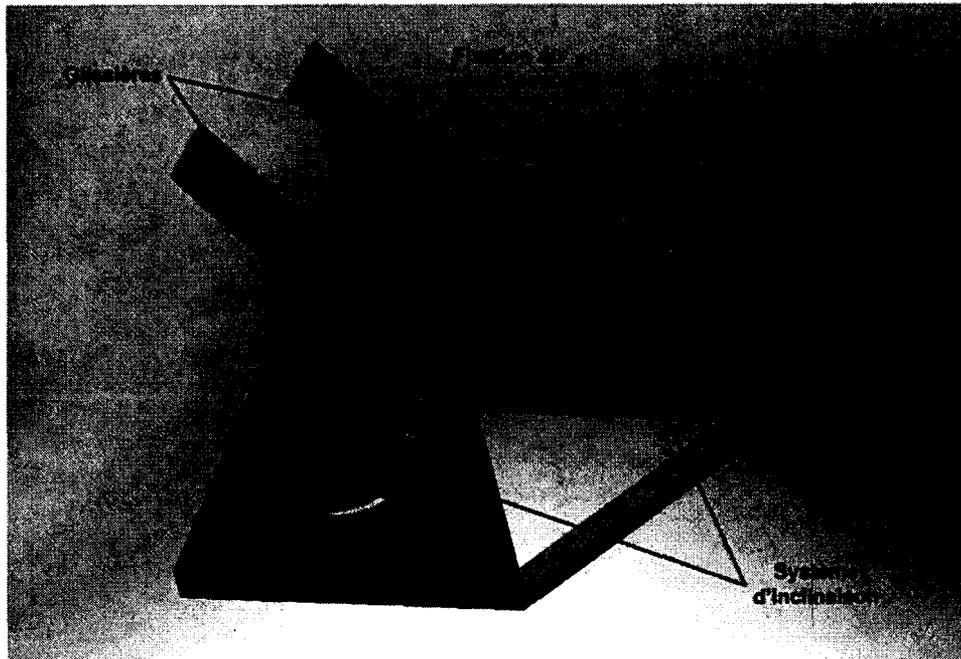


Figure B.3 Concept de la base du montage

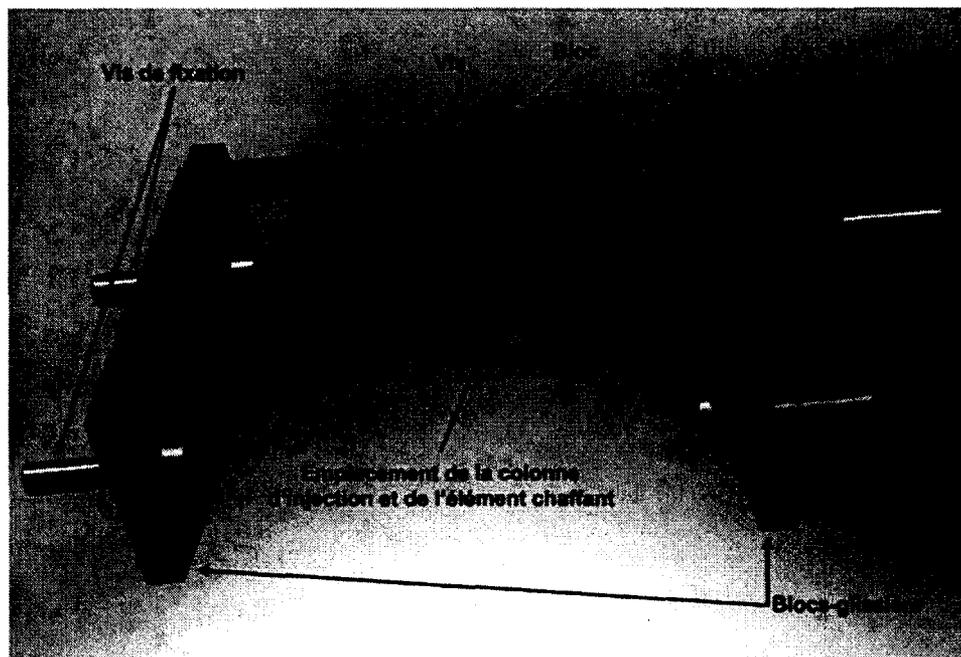


Figure B.4 Concept du système de support

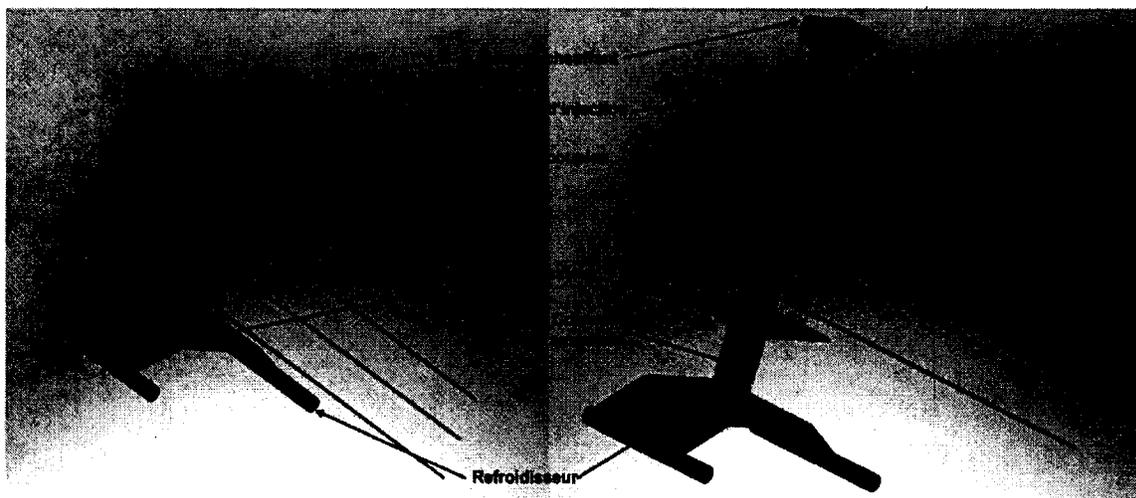


Figure B.5 Concept des composantes servant au chemin thermique principal

### B.3.4 Boîtier d'isolation

Le boîtier d'isolation est présenté à la figure B.6. Ses principaux rôles sont de contenir l'isolant thermique, soit de l'aérogel, et de supporter mécaniquement les capteurs thermiques. Il est composé en plusieurs sections afin que son contenu soit accessible. Le boîtier est fait en acier.

### B.3.5 Boîtier amovible

Le boîtier amovible est présenté à la figure B.7. Les blocs-glissières sont insérés sur les glissières de la base, présentés à la figure B.3. Les supports de colonne mobiles, faits de polymère, permettent l'alignement de la colonne d'injection mobile. Le polymère est utilisé pour limiter les pertes thermiques. Ces pièces sont à leur tour fixées sur les blocs-glissières. Le compartiment pour isolation est rempli d'aérogel de type Pyrogel<sup>®</sup> XT du fournisseur Aspen Aerogels<sup>®</sup> afin de limiter les pertes thermiques et d'assurer un flux unidirectionnel. La fiche technique est disponible à la section F.2.

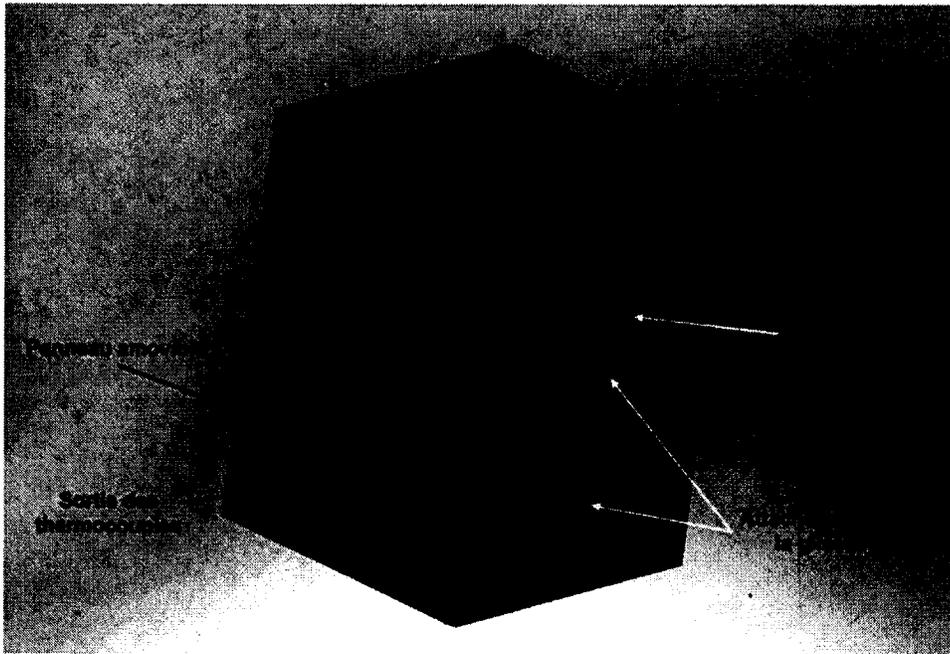


Figure B.6 Concept du boîtier

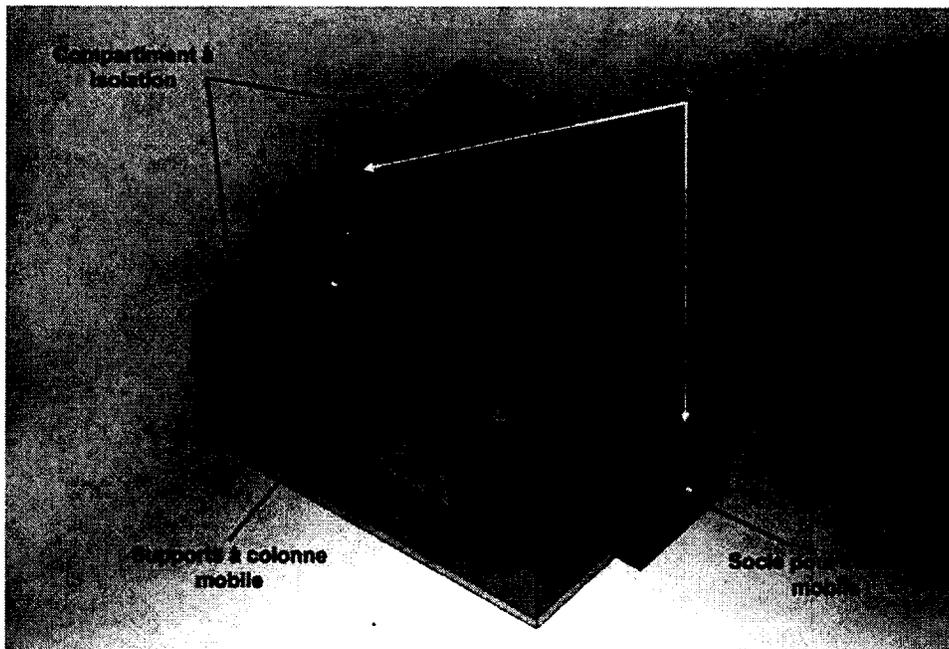


Figure B.7 Concept de la section amovible du montage



# ANNEXE C

## SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Les simulations, réalisées à l'aide de COMSOL<sup>TM</sup>, ont deux buts, soit :

- Confirmer que les dimensions du modèle CAO permettent une caractérisation réaliste et efficace des structures de refroidissement.
- Évaluer la sensibilité des résistances thermiques de la plateforme en caractérisation.

### C.1 Modèle

Le modèle utilisé inclut l'ensemble des éléments suivants : élément chauffant, colonne d'injection, récepteur, structure de support, isolant. Les éléments tels que les glissières, le système de refroidissement, le boîtier, la base et les capteurs de température ne sont pas inclus dans le modèle. Les paramètres de la simulation sont présentés dans cette section.

#### C.1.1 Hypothèses

Les hypothèses simplificatrices sur la modélisation de la plateforme sont :

- Double symétrie (seuls les trous pour capteurs de température de la colonne d'injection brisent cette double symétrie) ;
- Le refroidissement est uniforme sous le récepteur.
- La convection naturelle n'est pas entravée par les surfaces avoisinantes.
- Le modèle est en régime permanent.

#### C.1.2 Géométrie

La géométrie utilisée pour la simulation de la plateforme de caractérisation provient d'une version simplifiée du modèle CAO présentée à l'annexe B. Le modèle pour simulations est présenté à la figure C.1. On remarque que la colonne d'injection a été conservée avec les trous destinés aux capteurs thermiques. Cela, pour évaluer l'obstruction que ces derniers font au passage du flux. On note que cette obstruction est doublée dans la simulation en raison du plan de symétrie, alors qu'en réalité elle est présente que d'un côté de la colonne d'injection.

#### C.1.3 Propriété des matériaux

L'hypothèse du régime permanent exclut de la simulation toutes les propriétés thermiques des matériaux, à l'exception de la conductivité thermique, présentée au tableau C.1. La

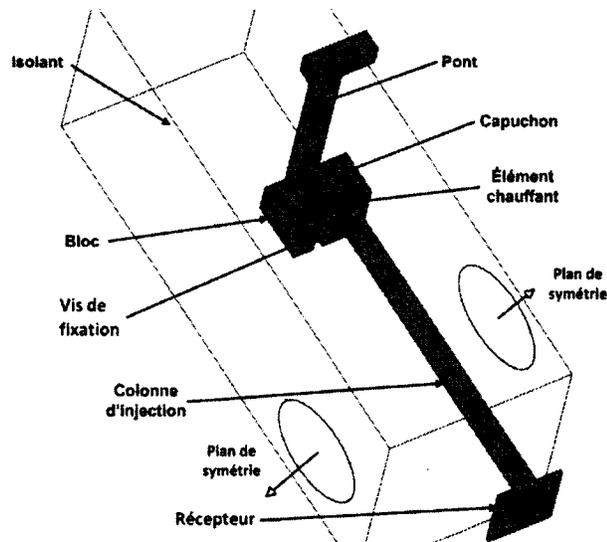


Figure C.1 Modèle de la simulation de l'injecteur

conductivité thermique est une propriété de la matière qui varie selon la température. Cette variation sur certains matériaux peut modifier considérablement leur résistance thermique. C'est le cas de la colonne d'injection, faite en cuivre. De plus, la colonne est soumise à un important gradient de température. Une étude réalisée par Robinson [27] traite notamment de la conductivité thermique en fonction de la température du cuivre C11000. Une corrélation de la conductivité thermique en fonction de la température, réalisée dans le cadre de ce travail, est fondée sur cette étude et présentée au tableau C.1.

La conductivité de l'isolant est également posée en fonction de la température. Cela est justifié par une variation appréciable de cette conductivité selon la température, ainsi qu'un gradient de température important à l'intérieur de l'isolation du boîtier. L'équation de la conductivité de l'isolant a été directement obtenue à partir de la fiche technique du fabricant, répertoriée à l'annexe F.2.

Tableau C.1 Conductivité thermique des matériaux

Composante	Matériau	Valeur
-	-	$\frac{W}{m \cdot K}$
Récepteur	Cuivre	400
Colonne d'injection	Cuivre	$1.593 * 10^{-4}T^2 - 0.2015T + 433.17$
Élément chauffant	Céramique	140
Capuchon	Acier inoxydable	15
Vis	Acier inoxydable	15
Pont	Acier inoxydable	15
Blocs	Acier inoxydable	15
Isolant	Pyrogel	$3 * 10^{-10}T^3 - 3 * 10^{-8}T^2 + 3 * 10^{-5}T + 0.0199$

\*Les températures  $T$  sont en K

### C.1.4 Conditions aux limites

Les conditions limites relatives à la plateforme de caractérisation sont présentées au tableau C.2. La condition limite du refroidissement est posée directement et uniformément sous le récepteur. On suppose donc que le système de refroidissement offre une convection constante sous toute la surface du récepteur et on néglige la diffusion du flux thermique au travers de sa paroi.

Quant à l'ensemble des parois extérieures de l'injecteur, on suppose qu'elles sont soumises à la convection naturelle. Cette dernière pouvant varier en fonction de la température ambiante, de l'humidité ou de l'aération de la pièce, des valeurs relativement élevées ont été posées afin de représenter un « pire cas ». Les conséquences des pertes thermiques entre les parois de la plateforme et l'air ambiant sont :

- La nécessité de fournir une puissance plus élevée à l'élément chauffant pour obtenir un même flux.
- La perte de précision concernant la mesure du flux au travers la colonne d'injection. Des pertes dans la portion instrumentée de la colonne provoquent une mesure de résistance sous-évaluée.

## C.2 Résultats

En utilisant les conditions décrites dans la section précédente pour réaliser la simulation, on obtient un profil de température en régime établi et un profil du flux thermique. Ces deux profils sont les résultats à partir desquels sont analysés les performances du montage.

### C.2.1 Gradients de température

Le profil de température du montage est présenté à la figure C.2. Les températures à différents points sur la colonne sont présentés au tableau C.3.

Tableau C.2 Conditions limites de simulation

Condition limite	Emplacement	Valeur	Unité
Convection	Parois verticales	20	W/m <sup>2</sup> *K
Convection	Parois horizontales (face vers le bas)	15	W/m <sup>2</sup> *K
Convection	Parois horizontales (face vers le haut)	25	W/m <sup>2</sup> *K
Convection	Surface inférieure au récepteur	30 000	W/m <sup>2</sup> *K
Génération de chaleur	Élément chauffant	1.3 * 10 <sup>7</sup> 30.5	W/m <sup>3</sup> W
Adiabatique	Surfaces de symétrie	0	W/m <sup>2</sup>
Température du fluide	Surface inférieure du récepteur	295	K
Température ambiante	Surfaces soumises à la convection naturelle	295	K

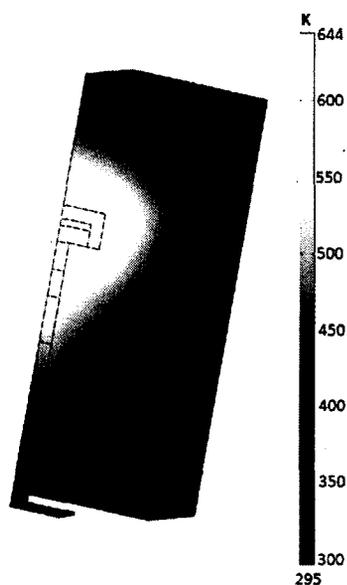


Figure C.2 Simulation de la température de l'injecteur pour la caractérisation globale

Tableau C.3 Distribution de la température de la simulation de l'injecteur

<b>Emplacement</b>	<b>Température</b>
-	K
Jonction avec l'élément chauffant	638.9
Thermocouple 1	563.8
Thermocouple 2	507.0
Thermocouple 3	451.2
Thermocouple 4	396.2
Thermocouple 5	341.9
Dessus du récepteur (Centre de la colonne)	313.0
Dessous du récepteur (Centre de la colonne)	311.9

Il existe donc une différence de température de 221.9 K entre le premier et le dernier thermocouple et approximativement 55 K entre les thermocouples contigus. Cette différence de température peut facilement être mesurée à l'aide de capteurs thermiques commerciaux de l'ordre de  $\pm 1$  K.

### C.2.2 Mesure du flux thermique et de ses pertes

Le profil du flux thermique le long de la colonne d'injection est présenté à la figure C.3. Des mesures du flux de la colonne ont été prises. Ces mesures sont données dans le tableau C.4. Les distances sont prises à partir de l'extrémité de la colonne en contact avec le récepteur.

On remarque que moins de 1 W s'échappe de la colonne pour un flux initialement à 26,97 W. Si l'on prend alors pour référence le flux thermique à 0,5 cm du bas de la colonne et que l'on prend pour référence le niveau du thermocouple 1, les pertes sont évaluées à 0.25 W. Cela représente approximativement 1 % de perte sur le flux traversant la section instrumentée de la colonne d'injection, ce qui est acceptable.

Pour transformer les mesures de température en flux, on utilise l'équation A.1 en sachant que le quart de la colonne d'injection possède  $0.25 \text{ m}^2$ , une conductivité suivant la corrélation décrite au tableau C.1 et une distance entre thermocouples adjacents de 17.5 mm.

Pour vérifier l'erreur induite par les pertes de chaleur sur la mesure du flux, on réalise une simulation similaire à celle réalisée à la figure C.3. Le système de support et les TIMs ne sont cependant pas représentés. Les paramètres utilisés pour la simulation sont décrits dans le tableau C.5. Les équations de convection naturelle choisies sont celles proposées dans le logiciel COMSOL et sont adaptées aux positions verticales, horizontales face vers le haut et horizontales face vers le bas des surfaces.

Le flux est obtenu à partir de températures mesurées dans deux socles différents et utilise l'équation 3.1 pour obtenir le flux. Quant au flux obtenu par intégration, dit flux sortant, il est mesuré sur une section de la colonne près de l'extrémité en contact avec le récepteur. Les résultats de ces deux méthodes de mesure du flux sont présentées à la figure C.4. Le flux injecté est également indiqué pour avoir un aperçu de la différence avec les autres mesures. Ces données forment donc naturellement une pente de 1, puisque la valeur observée est la valeur injectée.

On remarque que les données du flux mesuré et du flux sortant fournissent des valeurs sensiblement proches l'une de l'autre. On observe cependant que l'écart absolu est légèrement plus grand au fur et à mesure que le flux augmente. De plus, les flux mesurés et sortants sont sensiblement près de la valeur injectée, suggérant que les pertes thermiques le long de la colonne sont faibles. Cependant, il faut noter que cette simulation possède de nombreuses simplifications et hypothèses et doit plutôt être vue comme un indice que le concept et le dimensionnement sont potentiellement applicables qu'une démonstration quantifiée de la précision de la plateforme.



Figure C.3 Simulation du flux thermique de l'injecteur pour la caractérisation globale

Tableau C.4 Flux thermique calculé par intégration de surface dans la simulation de l'injecteur

<b>Emplacement</b>	<b>Thermocouple correspondant</b>	<b>Flux thermique</b>
<b>mm</b>	<b>-</b>	<b>W</b>
0		26.02
0.5		26.65
1		26.65
1.5		26.64
2		26.65
5		26.66
5.5		26.66
9.5	5	26.68
27	4	26.71
44.5	3	26.75
62	2	26.81
79.5	1	26.9
89.5		26.97

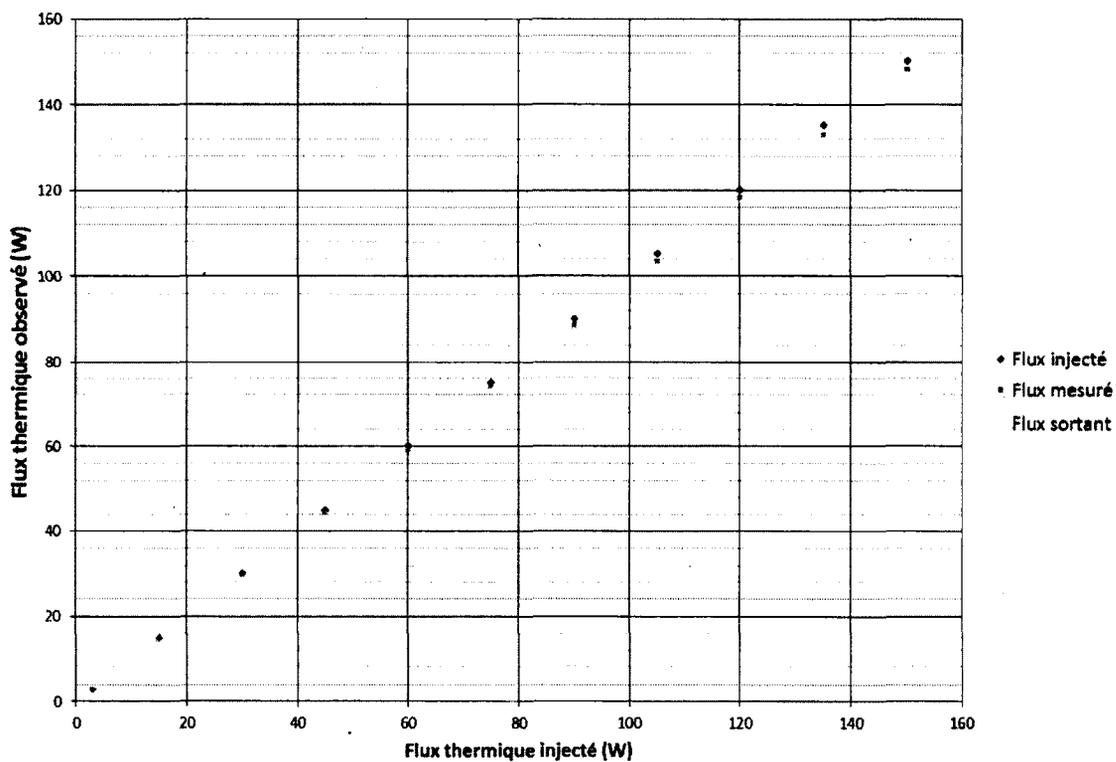


Figure C.4 Comparaison sur une simulation entre le flux thermique mesuré à l'aide des températures dans les socles de la colonne et par l'intégration du flux thermique sur une section de la colonne

Tableau C.5 Paramètres pour la simulation comparant le flux thermique mesuré par capteurs thermiques et par intégration sur une section de la colonne d'injection

Paramètre	Valeur	Unité
Convection	Équation de convection naturelle fournie par COMSOL	$W/m^2 * K$
Refroidissement sous le récepteur	1575	$W/m^2 * K$
Température sous le récepteur	288	$K$
Aire refroidie sous le récepteur	17.64	$cm^2$
Conduction de l'isolation (Aerogel 2 cm d'épaisseur)	0,016	$W/m * K$
Conduction de l'élément chauffant	140	$W/m * K$
Conduction des capteurs thermiques	20	
Diamètre des capteurs thermiques	1	$mm$
Capteurs thermiques (section hors socle)	Thermiquement isolés	-
Aire de section de la colonne	10 x 10	$mm^2$
Distance entre les capteurs	70	$mm$
Dimensions de l'élément chauffant (hauteur x largeur x longueur)	1.5 x 1.5 x 2.5	$mm * mm * mm$

### C.3 Étude de sensibilité

Cette sous-section traite de l'impact de sensibilité des résistances thermiques sur les principaux chemins thermiques de l'injecteur. Pour ce, deux modèles numériques sont utilisés afin d'évaluer les chemins thermiques pour la caractérisation globale et série. Les conditions limites, commune aux deux modèles, sont :

- Coefficient de convection naturelle :
  - Surfaces horizontales (face vers le haut) :  $20 \frac{W}{m^2-K}$
  - Surfaces horizontales (face vers le bas) :  $10 \frac{W}{m^2-K}$
  - Surfaces verticales :  $15 \frac{W}{m^2-K}$
- Température ambiante : 295 K
- Coefficient de convection forcée (refroidissement) :  $30\ 000 \frac{W}{m^2-K}$
- Température de l'eau de refroidissement : 298 K

Pour la simulation, un quart de l'injecteur sera modélisé, dû aux axes de symétrie. La puissance injectée par l'élément chauffant est de 22.8 W, soit une puissance de 5.7 W pour le quart. Les autres paramètres utilisés pour le modèle sont :

- Conductivité de la structure d'acier :  $15 \frac{W}{m-K}$

- Échantillon à caractériser :
  - Conductivité :  $150 \frac{W}{m-K}$
  - Épaisseur : 1.05 mm
- Épaisseur et conductivité des interfaces thermiques :
  - Entre l'élément chauffant et la structure d'acier :  $50 \mu m$  et  $0.1 \frac{W}{m-K}$
  - Entre l'élément chauffant et la colonne d'injection :  $50 \mu m$  et  $5 \frac{W}{m-K}$
  - Entre le récepteur et la/les colonne(s) :  $50 \mu m$  et  $7 \frac{W}{m-K}$  (2X pour la caractérisation série)

On réalise l'étude numérique en mesurant par intégration sur la section de la colonne la valeur nominale du flux traversant cette surface au niveau du thermocouple 5. On mesure ensuite les résistances des différents éléments, les ayant doublés dans un premier temps et réduits de moitié dans un second temps. On note leur impact en pourcentage sur le flux mesuré en divisant le flux obtenu par la valeur nominale.

### C.3.1 Caractérisation globale

La simulation sous les paramètres initiaux est présentée à la figure C.5. Le flux nominal recueilli dans la colonne d'injection est de 5.107 W. Quant au réseau de résistances étudié, il est illustré de manière simplifiée à la figure C.6. Le résultat des variations des résistances doublées et réduites de moitié est présenté au tableau C.6.

On remarque que l'ensemble des variations des résistances ont tous un impact inférieur à 10 % sur la fluctuation du flux thermique traversant la colonne. Cela signifie que la colonne d'injection est de loin le principal trajet thermique emprunté par la chaleur.

Or, l'impact des TIMs semble largement sous-estimé dans ces simulations par le modèle utilisé, car selon les résultats fournis au chapitre 3, la résistance des TIMs possède un impact majeur sur la résistance totale. À l'exception des TIMs, il semble que l'utilisation de la colonne d'injection et de la puissance de refroidissement sont suffisants pour créer un trajet préférentiel à la chaleur.

### C.3.2 Caractérisation série

La simulation sous les paramètres initiaux est présentée à la figure C.7. Le flux nominal recueilli est de 4.859 W. Quant au réseau de résistances étudié, il est illustré de manière simplifiée à la figure C.8.

Le résultat des variations des résistances doublées et réduites de moitié sur le flux est présenté au tableau C.7. Les conclusions pour la caractérisation série sont sensiblement les mêmes que pour la caractérisation globale. Or, on remarque un impact légèrement plus marqué de chaque changement de résistance sur le flux de chaleur. Cela s'explique par le fait que le chemin thermique principal est plus résistif que celui de la caractérisation

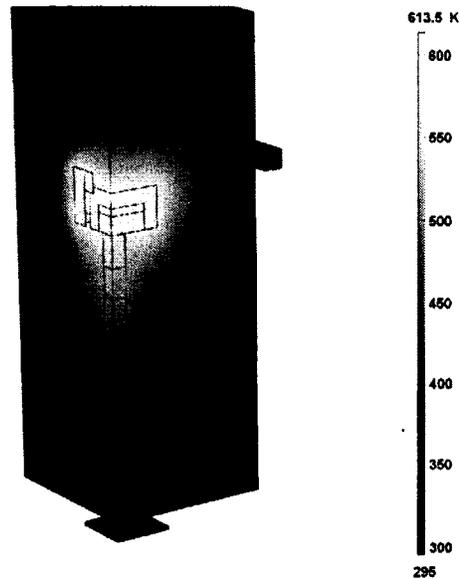


Figure C.5 Distribution de la température (avant modification) pour l'étude de sensibilité de l'injecteur lors de la caractérisation globale

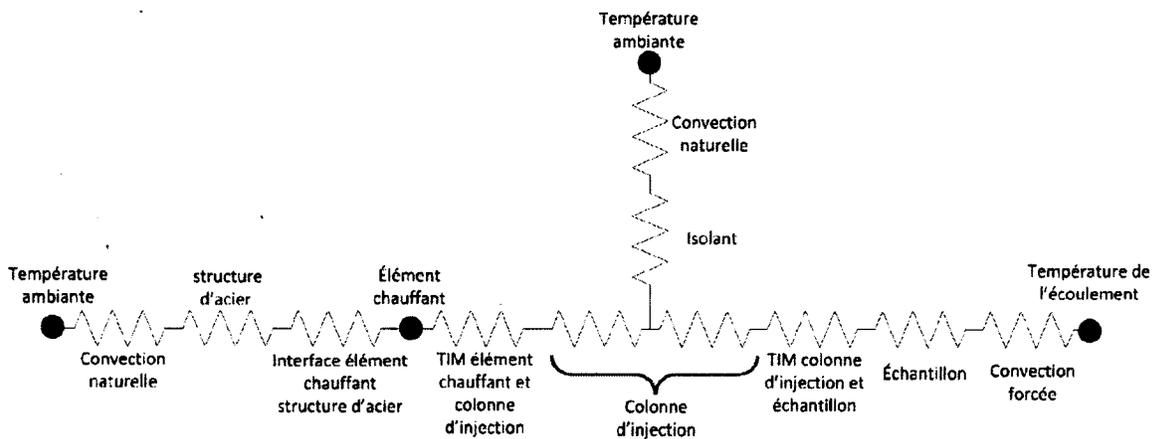


Figure C.6 Schématisation du modèle de l'étude de sensibilité de l'injecteur pour la caractérisation globale

Tableau C.6 Flux traversant la colonne d'injection selon les résistances thermiques pour caractérisation globale

Résistance variée	Puissance lorsque résistance doublée	Puissance lorsque $\frac{1}{2}$ résistance
-	W (%)	W (%)
Convection naturelle	4.78 (1.71)	4.96 (2.03)
Structure d'acier	5.02 (3.27)	4.70 (3.27)
Isolant	5.04 (3.81)	4.55 (6.3)
TIM échantillon	4.81 (0.99)	4.88 (0.49)
Échantillon	4.85 (0.25)	4.87 (0.12)
Interface élément chauffant et structure d'acier	4.86 (0)	4.86 (0.02)
TIM élément chauffant et colonne d'injection	4.86 (0.04)	4.89 (0.56)
Convection forcée	4.81 (1.07)	4.89 (0.56)

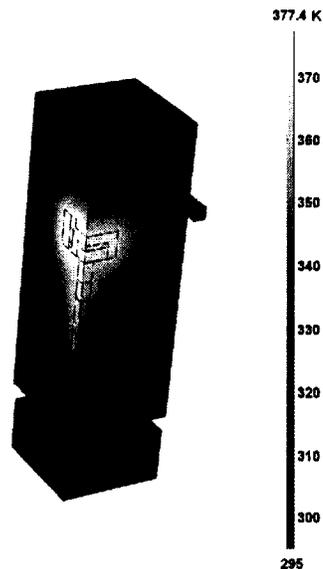


Figure C.7 Distribution de la température (avant modification) pour l'étude de sensibilité de l'injecteur lors de la caractérisation en série

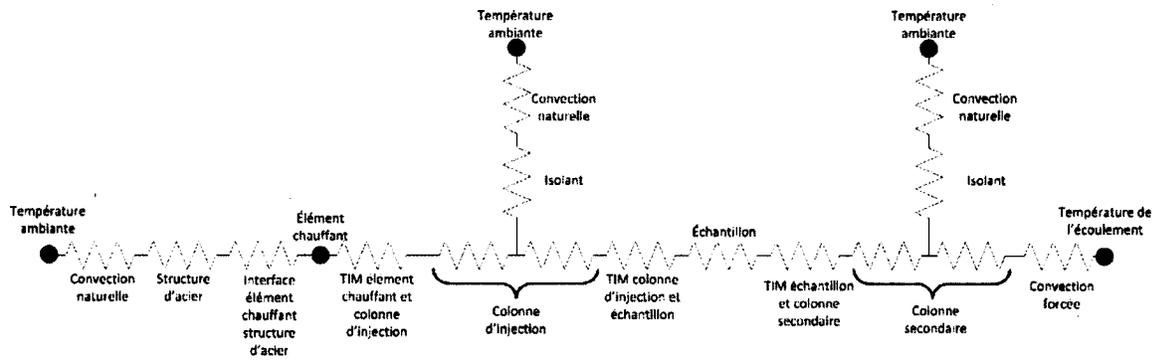


Figure C.8 Schématisation du modèle de l'étude de sensibilité de l'injecteur pour la caractérisation en série

globale. Les autres trajets thermiques sont donc plus importants par rapport au trajet principal. Encore ici, les TIMs semblent sous-évalués.

Tableau C.7 Flux traversant la colonne d'injection selon les résistances thermiques pour caractérisation en série

<b>Résistance variée</b>	<b>Puissance lorsque résistance doublée</b>	<b>Puissance lorsque <math>\frac{1}{2}</math> résistance</b>
-	W (%)	W (%)
Convection naturelle	5.19 (1.64)	5.03 (1.53)
Structure d'acier	5.23 (2.43)	4.98 (2.45)
Isolant	5.24(2.64)	4.88 (4.5)
TIM échantillon	5.07 (0.76)	5.13 (0.41)
Échantillon	5.09 (0.31)	5.12 (0.23)
Interface élément chauffant et structure d'acier	5.11 (0.02)	5.11 (0)
TIM élément chauffant et colonne d'injection	5.11 (0.04)	5.11 (0.04)
Convection forcée	5.09 (0.43)	5.12 (0.29)



# ANNEXE D

## Composantes de la plateforme

La plateforme est réalisée telle que présentée à la figure D.1. Ses différentes composantes sont fabriquées ou achetées.

### D.1 Colonne d'injection

La colonne d'injection conçue et présentée à la figure D.2 est composée de cuivre C11000. Elle a une section de 25 mm X 15 mm sur 6 mm de haut, suivi d'une section de 1 cm X 1 cm sur 10 cm de haut. Cinq trous destinés aux thermocouples d'une profondeur de 1 mm et d'un diamètre de 1 mm sont percés à 1,75 cm les uns des autres, débutant à 1 cm de l'extrémité de la colonne. Une mise en plan détaillée est présentée à l'annexe F.1.

La différence de température dans la colonne peut aisément atteindre 85 °C entre la position du thermocouple le plus élevé et celle du moins élevé. Par ailleurs, des températures de 20 °C à plus de 175 °C peuvent être mesurées sur le thermocouple supérieur. Ces variations de température créent un changement du coefficient de conduction dans la colonne. Pour calculer avec précision le flux de chaleur le long de la colonne, la variation du coefficient de conduction du cuivre est intégrée dans le calcul du flux de chaleur. L'équation déterminant le coefficient de conduction tel que défini par Robinson [28] est utilisée pour développer une corrélation entre le coefficient de conduction et la température. Cette corrélation est présentée à la figure D.3. Ce coefficient est exprimé comme un polynôme du second ordre.

Cette corrélation remplace le  $k_c(T)$  du terme de droite de l'équation de Fourier simplifiée présentée à l'équation A.1. En résolvant l'intégration l'équation A.1, on obtient la corrélation D.1 entre le flux de chaleur et la différence de température entre deux thermocouples.

$$Q = \frac{A}{l_{a-b}} \left( \frac{\alpha}{3} (T_a^3 - T_b^3) - \frac{\beta}{2} (T_a^2 - T_b^2) + \gamma (T_a - T_b) \right) \quad (D.1)$$

Où les valeurs calculées pour les coefficients sont :  $\alpha = 1,62 * 10^{-4} \frac{W}{m-K^3}$ ,  $\beta = 0,203 \frac{W}{m-K^2}$ ,  $\gamma = 433,41 \frac{W}{m-K}$ .

### D.2 Isolant

L'isolant est utilisé pour minimiser les chemins thermiques autres que celui de la colonne d'injection. Cet isolant doit supporter des températures de service supérieures à 350 °C et doit également offrir une très faible conductivité thermique.

Le Pyrogel<sup>®</sup> XT d'Aspen Aerogels<sup>®</sup>, présenté à la figure D.4, a été sélectionné. Sa conductivité thermique est comprise entre 0,01 et 0,04  $\frac{W}{m-K}$  sur une plage allant de la

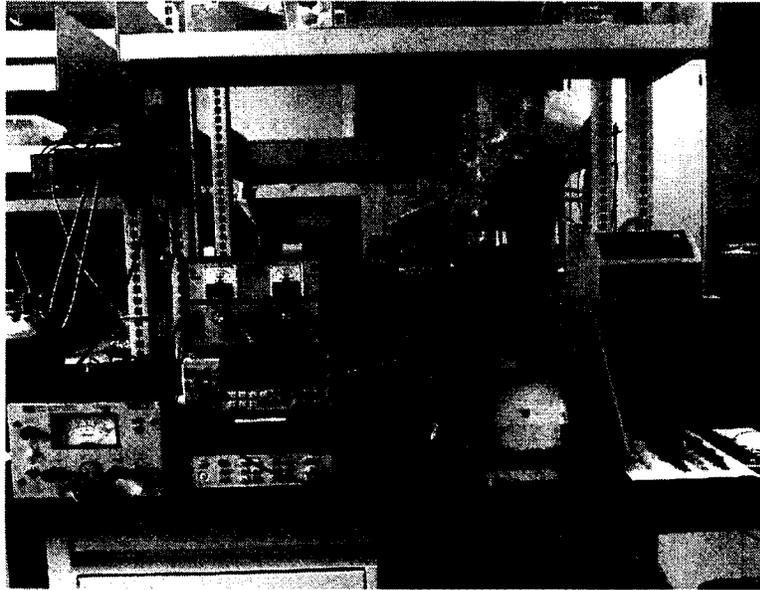


Figure D.1 Plateforme de caractérisation thermique

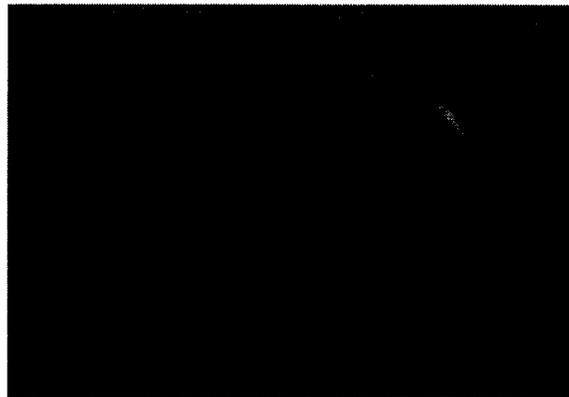


Figure D.2 Colonne d'injection de chaleur

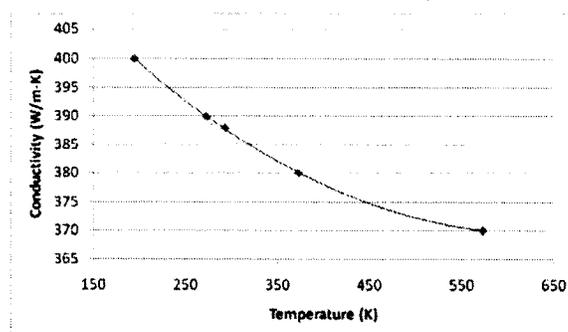


Figure D.3 Corrélation de la conductivité thermique du cuivre en fonction de la température. Les points représentent les données de Robinson [28].

température ambiante jusqu'à 350 °C. L'isolant entoure la colonne sur une épaisseur d'au minimum 5 cm. Il est installé dans un boîtier qui entoure l'ensemble de la structure d'injection afin de conserver ses particules fines qui le composent.

### D.3 Élément chauffant

L'élément chauffant génère le flux de chaleur. Sa surface chauffée doit être similaire autant que possible de la surface d'injection. Plus ces dimensions sont rapprochées, moins il y aura nécessité de concentrer ou répartir le flux dans la colonne d'injection. Il doit également générer un flux de chaleur de plus de  $100 \frac{W}{cm^2}$  pour fournir une puissance suffisante au récepteur.

L'élément chauffant sélectionné est le CER-1-01-00001 Ultramic<sup>TM</sup> de Watlow<sup>®</sup>, présenté à la figure D.5. Ses dimensions sont de 15 mm X 25 mm X 2,5 mm, sa densité de puissance en chaleur est de  $155,04 \frac{W}{cm^2}$  et sa résistance électrique est d'environ 30  $\Omega$ . Il supporte des températures de 400 °C, mais la pâte thermique (Red Ice 611HTC de TIMTronics) utilisée pour le relier à la colonne d'injection ne supporte que 350 °C par intermittence. C'est donc la pâte thermique qui est l'élément limitant de la puissance générée par la plateforme. Les fiches techniques de l'élément chauffant et de la pâte thermique sont présentées à la section F.2.

### D.4 Colonne mobile

Pour réaliser la caractérisation en série, un ensemble incluant la colonne supplémentaire doit être ajouté entre le récepteur à caractériser et le système de refroidissement. Il doit fournir la même isolation que celle utilisée pour la colonne de l'injecteur et offrir un bon parallélisme entre ses extrémités, le récepteur et le système de refroidissement.

Un bloc de cuivre C11000 de 1 cm X 1 cm de section et de 3 cm de long est utilisé pour former la colonne secondaire. Il est fixé à un boîtier ouvert et rempli d'isolant Pyrogel<sup>®</sup> XT et s'intègre aux glissières utilisées pour l'injecteur. La figure D.6 présente cet ensemble sans isolation et avec seulement une partie boîtier. Les dimensions sont présentées dans la mise en plan de la section F.1.

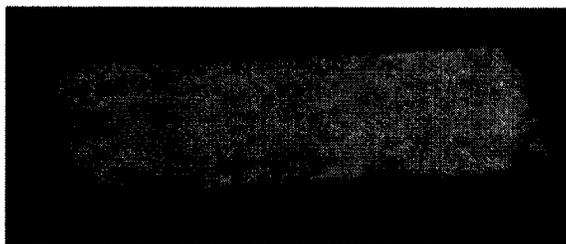


Figure D.4 Isolant Pyrogel<sup>®</sup> XT d'Aspen Aerogels<sup>®</sup>

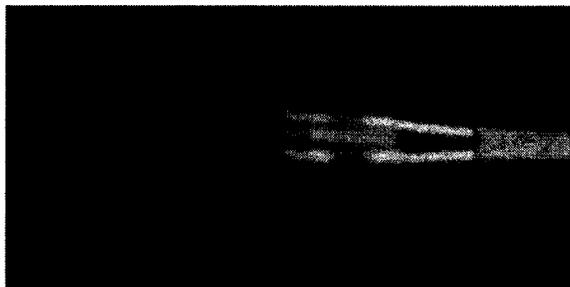


Figure D.5 Élément chauffant de Watlow®

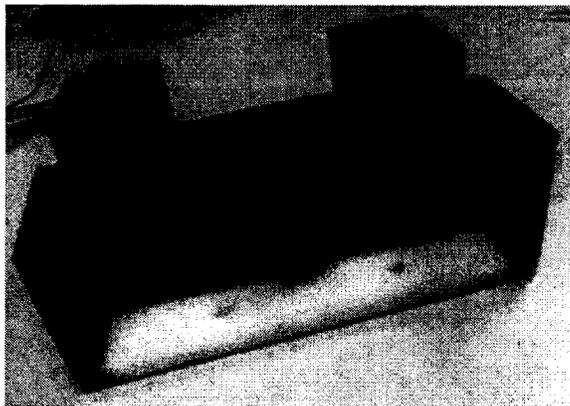


Figure D.6 Module de la colonne secondaire pour la caractérisation en série

## D.5 Matériaux d'interface thermique

Pour réduire la résistance thermique entre les interfaces créées par les extrémités des colonnes, le récepteur et le système de refroidissement, un TIM est utilisé. Il doit avoir une conductivité thermique élevée et offrir une résistance thermique constante entre chaque test.

Présentée à la figure D.7, le Tpli 210<sup>TM</sup> de Laird Technologies Inc. a été sélectionné. C'est un film qui possède une conductivité thermique de  $6 \frac{W}{m-K}$  avec une épaisseur de 0,25 mm, ce qui ne représente qu'une résistance de  $0.42 \frac{^{\circ}C}{W}$  pour une surface de  $1 \text{ cm}^2$ . Une masse de 6.3 kg est ajoutée sur l'injecteur afin de fournir une pression plus élevée au TIM.

## D.6 Structure de soutien

La colonne d'injection doit être fixée afin de conserver son extrémité parallèle au récepteur à caractériser. L'élément chauffant doit également être en contact étroit avec la colonne d'injection pour minimiser la résistance thermique entre ces deux composantes. Ces deux fonctions sont accomplies par la structure de soutien. Celle-ci doit avoir une température de service de plus de  $350 \text{ }^{\circ}C$ , être composée d'un matériau usinable et doit offrir une rigidité suffisante.

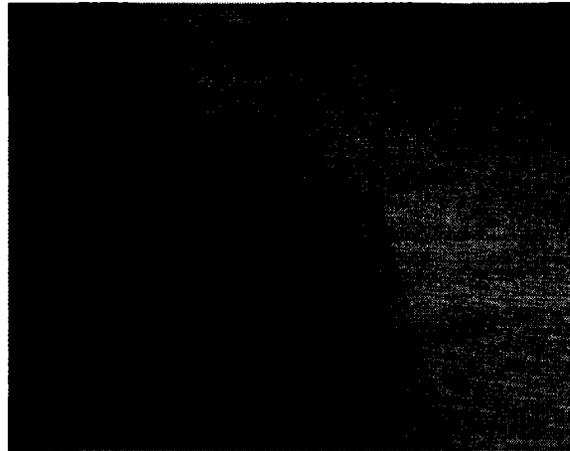


Figure D.7 Matériau d'interface thermique Tpli<sup>TM</sup> 210 de Laird Technologies Inc. installé sur la plaque de refroidissement.

Pour répondre à ces critères, une structure en acier inoxydable a été retenue. Elle offre une bonne rigidité et offre une conductivité thermique d'approximativement  $15 \frac{W}{m-K}$  qui, sans être négligeable, est relativement faible pour un métal. La figure D.8 présente la structure et les dimensions de ses différentes composantes sont présentées à la section F.1.

## D.7 Système de refroidissement

Ce système doit offrir un refroidissement constant afin de mesurer correctement la résistance thermique. Le système de refroidissement thermique retenu est le Ascent CP25<sup>TM</sup> de Lytron<sup>®</sup>, présenté à la figure D.9. Il s'agit d'une plaque de refroidissement avec des canaux entrecroisés à l'intérieur. La plaque offre une surface de refroidissement de 33 mm x 58 mm et un coefficient de convection de  $0,33 \frac{°C-cm^2}{W}$ . Il peut également soutenir des débits d'eau de plus de 4 l/min.

Le système de refroidissement de l'eau est présenté à la figure D.10. Le circuit est régulé par un Ministat Huber<sup>®</sup> ayant un régulateur de température permettant une précision de  $\pm 0,1 °C$ . Cependant, une défautuosité sur le thermorégulateur le prive de sa capacité de refroidissement. Avant que l'eau soit retournée dans le régulateur, un refroidisseur



Figure D.8 Structure de support en acier inoxydable.

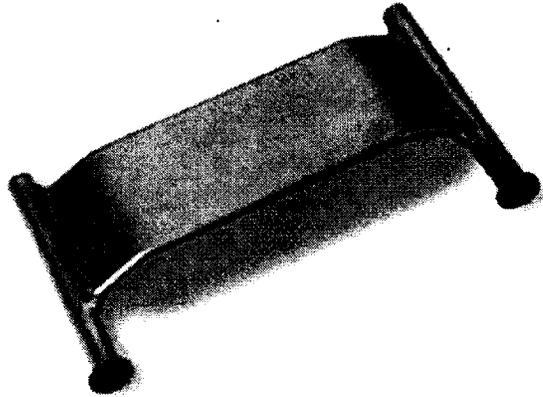


Figure D.9 Plaque de refroidissement Ascent CP25<sup>TM</sup> de Lytron®  
Source : Lytron®

thermoélectrique à effet Peltier refroidit le liquide pour évacuer la chaleur injectée dans l'eau par la colonne d'injection. Il s'agit du modèle CL-61 de TeTech Inc. L'ensemble du circuit produit un débit de 1,2 l/min.

## D.8 Acquisition et analyse de données

Le système d'acquisition de données lit et analyse les différents capteurs thermiques situés sur la plateforme. Il comprend les capteurs, le système d'acquisition de données, ainsi que le matériel permettant la commande et l'analyse des mesures.

### D.8.1 Capteurs de température

Deux ensembles de capteurs thermiques sont nécessaires pour mesurer la résistance thermique du récepteur. Le premier est celui utilisé pour mesurer la température de l'eau. Un capteur est utilisé à l'entrée et l'autre à la sortie du système de refroidissement afin de mesurer la température moyenne de l'eau. Ces mesures doivent être précises, car elles sont directement reliées à la précision de la mesure de la résistance.

Comme capteurs, deux RDT D4-80-RDT-class A de Nanmac Co. sont choisis. Ils offrent une précision de  $\pm 0,2$  °C à 20 °C selon la norme DIN EN 60751 et peuvent être installés sur la plate-forme avec raccords Swagelock®. La figure D.11 présente un tel capteur.

La deuxième série de capteurs thermiques sert à mesurer le gradient de température sur la colonne d'injection. Dans ce cas, les capteurs doivent être aussi étroits que possible pour éviter de former des chemins thermiques trop importants par rapport à la colonne elle-même. En outre, ils doivent s'insérer dans les trous de la colonne d'injection, créés à cet effet. Ils doivent également offrir une bonne précision sur la mesure, supporter des températures de plus de 350 °C et mesurer la température exclusivement à leur extrémité.

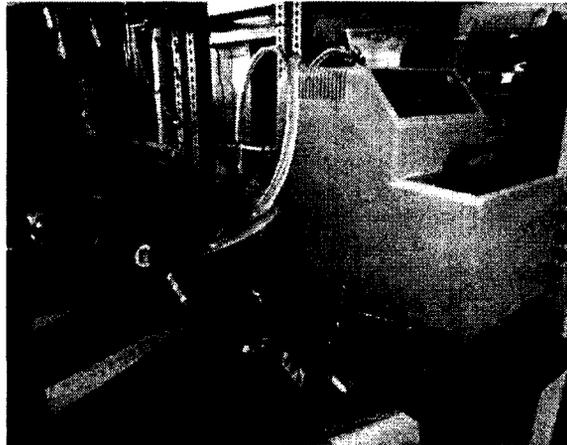


Figure D.10 Système de circulation d'eau utilisé pour la condition de refroidissement.



Figure D.11 RTDs classe A utilisés pour mesurer la température de l'eau à l'entrée et la sortie de la plaque de refroidissement.

Les capteurs choisis sont cinq thermocouples type "T" avec les limites spéciales d'erreur de  $\pm 0,5$  °C, soit les TMTSS-032(U)-6 d'Omega®. Ils ont 0,81 mm de diamètre et sont fixés dans les socles à l'aide de silicone pour calfeutrage résidentiel.

## D.8.2 Système d'acquisition de données

Le système d'acquisition de données doit lire tous les capteurs thermiques en temps réel ou presque afin de confirmer l'obtention de l'état stationnaire. Il faut également stocker les données afin qu'elles puissent être exploitées par un ordinateur. Le système d'acquisition de données sélectionné est le 34970A d'Agilent.

## D.8.3 Logiciel d'acquisition de données

Les données sont prises par le 34970A d'Agilent et sont transférées à un ordinateur. Un programme LabVIEW gère à la fois l'acquisition de données et leur analyse. Lorsque le système atteint le régime stationnaire, ce programme analyse les données pour fournir la résistance thermique du récepteur. L'obtention du régime stationnaire est une condition préalable indispensable au calcul de la résistance thermique, puisque les équations utilisées ne sont valides que pour cet état. Le programme utilisé analyse automatiquement l'obtention du régime stationnaire.

## D.9 Composantes diverses

### Mousse en polyuréthane

Pour éviter les pertes thermiques entre le récepteur et l'environnement et entre la plaque de refroidissement et l'environnement, une mousse de polyuréthane est placée sur les surfaces exposées à l'air ambiant. La conductivité approximative d'une telle mousse selon le site matweb.com, sous la rubrique *Overview of materials for Thermoset Polyurethane Foam, Unreinforced* [En ligne : 06-nov-11], est de 0.085 °C/W. Cela en fait donc un matériau apte à limiter la convection naturelle de l'air.

### Glissières

En vue d'ajuster l'extrémité de la colonne à la hauteur du récepteur ou d'insérer la section de colonne amovible, tout l'injecteur de chaleur (incluant l'élément chauffant, les thermocouples, la colonne d'injection, l'isolation et la structure de soutien) doit être mobile dans l'axe normal à la surface du récepteur.

Deux glissières sont ensuite réalisées afin d'offrir ce degré de liberté et sont présentées à la figure D.12. Des entretoises en Teflon<sup>TM</sup> sont installées entre les glissières et le module d'injection.

### Base pivotante

La base de la plate-forme est inclinable afin de caractériser les récepteurs liés à des systèmes de refroidissement dépendants de l'orientation avec la gravité. Une base inclinable à 90° a été réalisée pour satisfaire à ce critère. Une image du système d'inclinaison est présentée à la figure D.13.



Figure D.12 Glissières d'ajustement de l'injecteur de chaleur

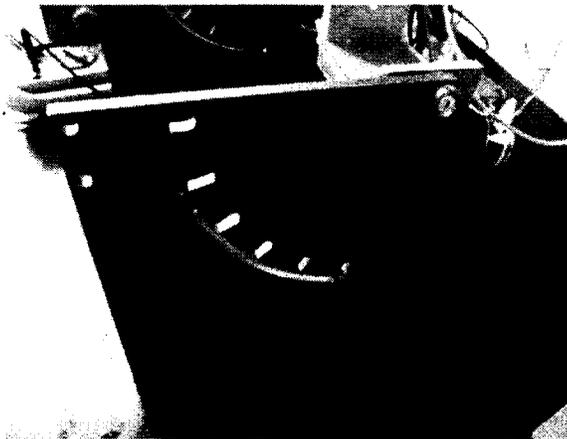


Figure D.13 Base de la plate-forme avec son système d'inclinaison

**Source et mesure de la puissance électrique**

Pour fournir l'alimentation électrique à l'élément chauffant, une source de tension est utilisée. Elle peut aller jusqu'à 2 A à 60 V, et peut supporter jusqu'à 120 W pour le chauffage. Un ampèremètre et un voltmètre sont insérés dans le circuit électrique pour mesurer la puissance électrique fournie à l'élément chauffant.

# ANNEXE E

## Programmation

Cette annexe traite du programme servant à opérer, lire et analyser les mesures de températures de la plateforme recueillies par l'intermédiaire du système d'acquisition. La programmation est réalisée à l'aide du logiciel LabVIEW<sup>®</sup>, lequel fait appel à une sous-routine exécutée par le logiciel Matlab<sup>®</sup>. La structure de programmation est présentée à la figure E.1. En ce qui a trait à l'interface utilisateur, une explication détaillée est présentée dans le guide d'utilisation à l'annexe I.

Cette structure comporte un programme principal, soit Acquisition.vi, accompagné par deux sous-programmes, soit Poly(SubVI).vi et Analyse.vi. Le programme Analyse.vi fait également appel à une fonction sous le format Matlab<sup>®</sup>, nommée f\_opt.m. Les sections suivantes décrivent plus en détails ces sous-programmes.

### E.1 Lecture et présentation des températures

Les fonctions de lecture et de présentation des températures est assuré par le programme Acquisition.vi, schématisé à la figure E.2. La lecture des capteurs se fait séquentiellement. Dans un premier temps, le programme communique avec le système d'acquisition de données, soit le Agilent 34970A, pour lui fournir les paramètres de mesure et lui donner le signal pour la prise de mesure relative aux thermocouples. Dans un second temps, il commande la lecture des résistances thermiques des RTDs. Une conversion est effectuée par la suite pour obtenir les températures représentant les mesures des RTDs. Les mesures de températures sont alors assemblées dans une matrice. Les lignes de cette matrice correspondent à chacun des capteurs dédiés, alors que les colonnes représentent les mesures prises dans le temps.

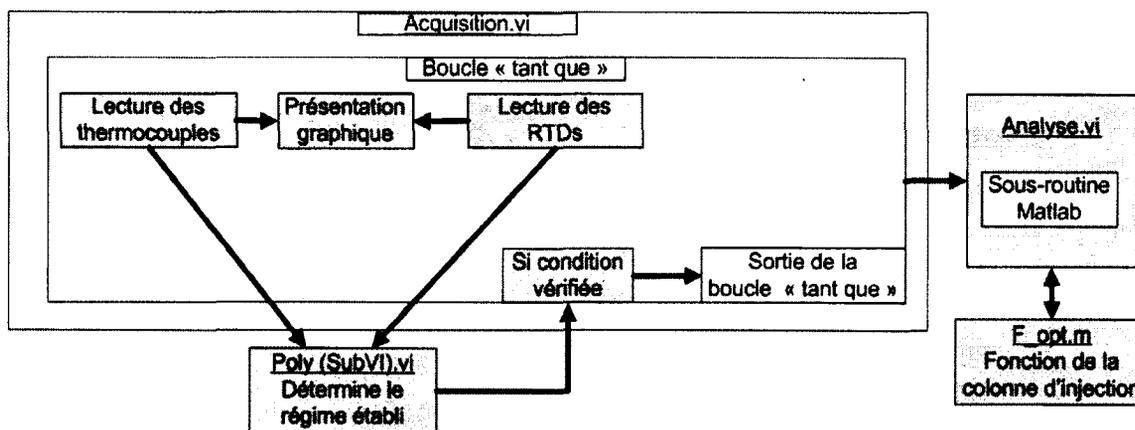


Figure E.1 Architecture de programmation

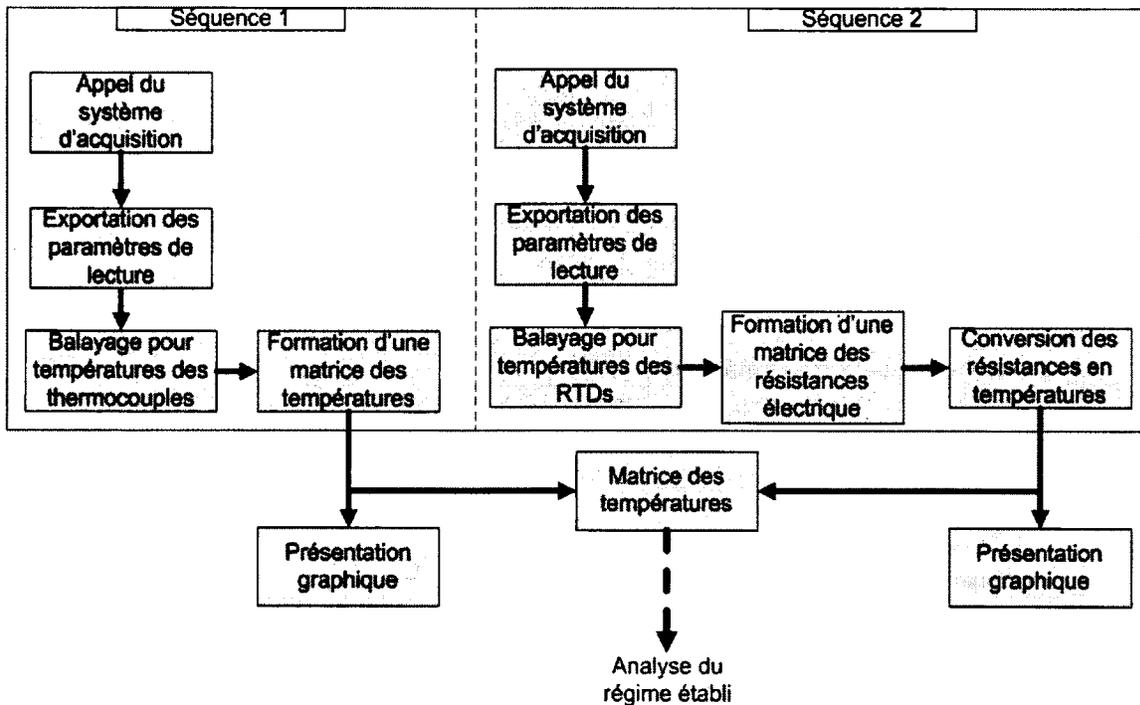


Figure E.2 Sous-programme de la lecture des mesures de température

La matrice est envoyée à chaque série d'acquisition au sous-programme Poly(SubVI).vi afin de valider si la caractérisation a atteint le régime permanent. Si le constat est négatif, une nouvelle série de données est effectuée. Si le constat est positif, la matrice est envoyée au sous-programme Analyse.vi pour en extraire la résistance thermique. Dans tous les cas, l'évolution des températures est présenté sur le graphique de l'interface utilisateur.

## E.2 Détection du régime établi

La structure du sous-programme présentant le fonctionnement de la détection du régime établi est illustré à la figure E.3. Ce sous-programme reçoit d'abord trois informations du programme principal, soit la matrice des températures, un nombre de mesures prédéfini par l'utilisateur et un seuil de sensibilité. Le nombre de mesures prédéfini précise combien des dernières mesures de températures pour chaque capteur le programme doit considérer. Ainsi, si ce nombre est de 15, cela signifie que les 15 dernières mesures sont considérées dans les calculs ultérieurs.

Le programme traite ensuite indépendamment chaque série tronquée des températures de chaque capteur. Il convertit la série de mesures en une fonction du second ordre. La pente obtenue par cette fonction est comparée avec le seuil de sensibilité. Si la valeur absolue de la pente est inférieure à ce seuil, le système considère la condition comme remplie. Cela est répété pour tous les capteurs.

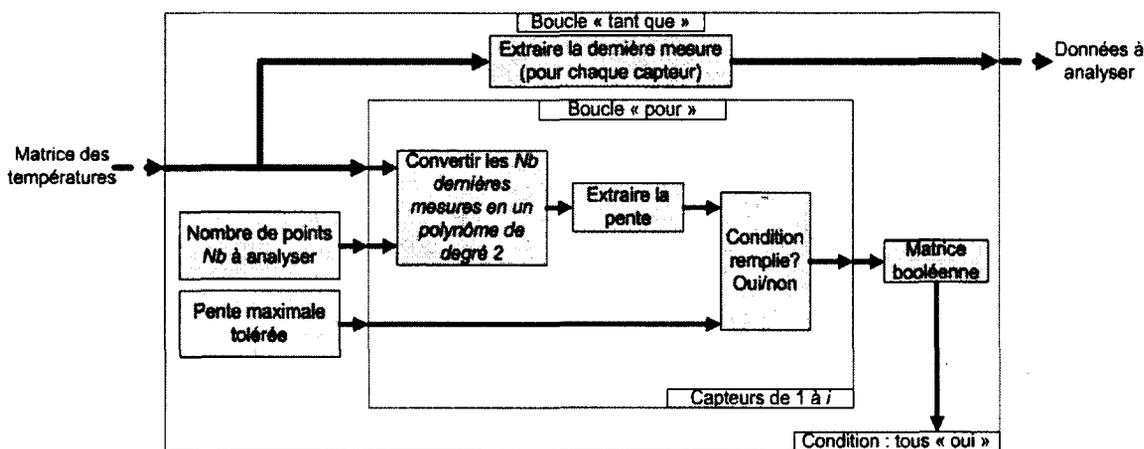


Figure E.3 Sous-programme destiné à la vérification du régime établi

Si toutes les pentes sont inférieures au seuil de sensibilité, cela signifie que la condition de régime établi est remplie. Le sous-programme informe alors le programme principal que la matrice de température peut être analysée à l'aide du sous-programme Analyse.vi.

Dans le cas qu'une ou plusieurs pentes ne soient pas sous le seuil de sensibilité, le sous-programme signale alors au programme principal qu'il faut effectuer une nouvelle acquisition de mesures et recommencer le présent sous-programme.

## E.3 Analyse des données

La structure du sous-programme présentant l'analyse des données de température est illustrée à la figure E.4. Une partie de ce sous-programme est exploitée par l'intermédiaire d'un second logiciel, soit Malab<sup>®</sup>. Ses intrants sont :

- Matrice des températures ;
- Valeurs initiales de flux et de température ;
- Fonction d'injection reliant la conductivité thermique de la colonne (variable selon la température), le gradient de température sur la colonne, les propriétés géométriques de la colonne, ainsi que le flux thermique résultant ;
- Les paramètres géométriques de la colonne d'injection ;
- Les coefficients liés à la conductivité de la colonne, soit  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .

Le script Matlab<sup>®</sup> débute par l'extraction des dernière données de température disponibles pour chacun des 5 thermocouples fixés à la colonne. Une estimation par la méthode des moindres carrés de la meilleure courbe joint les données de températures. Cette équation est compatible avec l'équation d'injection (présentée à la section E.4) et est élaborée à l'aide de la fonction « lsqcurvefit » et des valeurs initiales de flux et de température. Les températures utilisées pour la mesure de résistance sont calculées à partir de cette fonction pour les localisations où des thermocouples sont installés. On utilise alors ces points pour

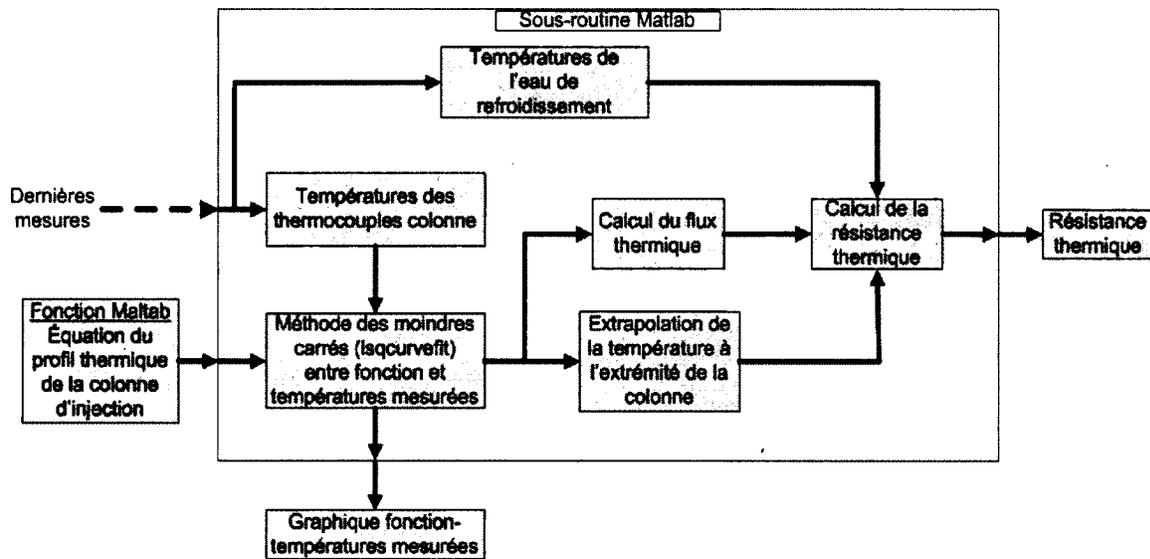


Figure E.4 Sous-programme permettant le calcul de la résistance thermique

extrapoler la température à l'extrémité de la colonne d'injection, ainsi que de fournir le flux thermique traversant la colonne d'injection.

La température de l'eau traversant la plaque de refroidissement est obtenue en effectuant la moyenne entre la température d'entrée et de sortie de la plaque de refroidissement: Cette température, avec la température de l'extrémité de la colonne et le flux thermique permettent le calcul de la résistance thermique entre l'extrémité de la colonne et l'eau de refroidissement. Cette résistance est retournée au programme principal pour être affichée sur l'interface de l'utilisateur.

## E.4 Équation d'injection du flux thermique

L'équation d'injection est présente dans la fonction Matlab<sup>®</sup> `f_opt.m`. La fonction, utilisée par le sous-programme `Analyse.vi`, consiste en :

```
function f = f_opt(p,x) global a b c A

% f : Function defining a calculated temperatures (Tc) for the different
% thermocouples along the column. Coefficients "a", "b" and "c" are from
% the column's thermal conductivity and "p" and "x" are respectively the
% heat flux and the virtual origin point stated as the original assumption.
% A is the column's cross section area.

f=b./(3.*a)-(c./(3.*a)-b.^2./(9.*a.^2))./(((c./(3.*a)-b.^2.
/(9.*a.^2)).^3+((b.*c)./(6.*a.^2)-b.^3./(27.*a.^3)+(-A.*a.*
p(2).^3+A.*b.*p(2).^2-A.*c.*p(2)+p(1).*x)./(2.*A.*a)).^2).^
(1./2)+b.^3./(27.*a.^3)-(b.*c)./(6.*a.^2)-(-A.*a.*p(2).^3+
A.*b.*p(2).^2-A.*c.*p(2)+p(1).*x)./(2.*A.*a)).^(1./3)+(((c./
(3.*a)-b.^2./(9.*a.^2)).^3+((b.*c)./(6.*a.^2)-b.^3./(27.*a.^
3)+(-A.*a.*p(2).^3+A.*b.*p(2).^2-A.*c.*p(2)+p(1).*x)./(2.*A.
*a)).^2).^((1./2)+b.^3./(27.*a.^3)-(b.*c)./(6.*a.^2)-(-A.*a.*
p(2).^3+A.*b.*p(2).^2-A.*c.*p(2)+p(1).*x)./(2.*A.*a)).^(1./3);
```

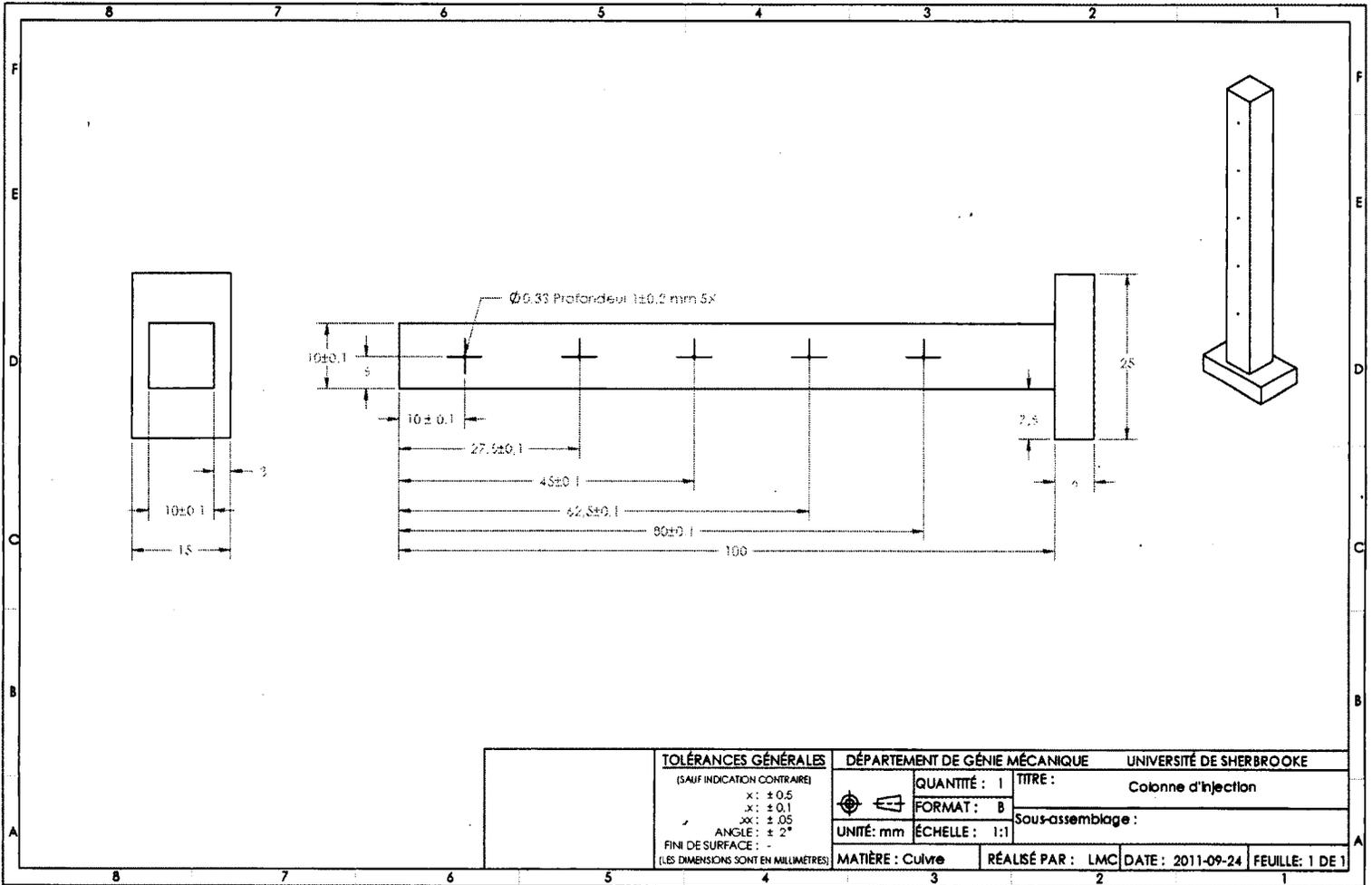
Celle-ci représente la fonction D.1 où la température du point à déterminer a été isolée du côté gauche de l'équation. L'autre température représente la température d'un point virtuel fixé au-delà du point le plus haut de la colonne.



# ANNEXE F

## Mises en plan et fiches techniques

### F.1 Mises en plan

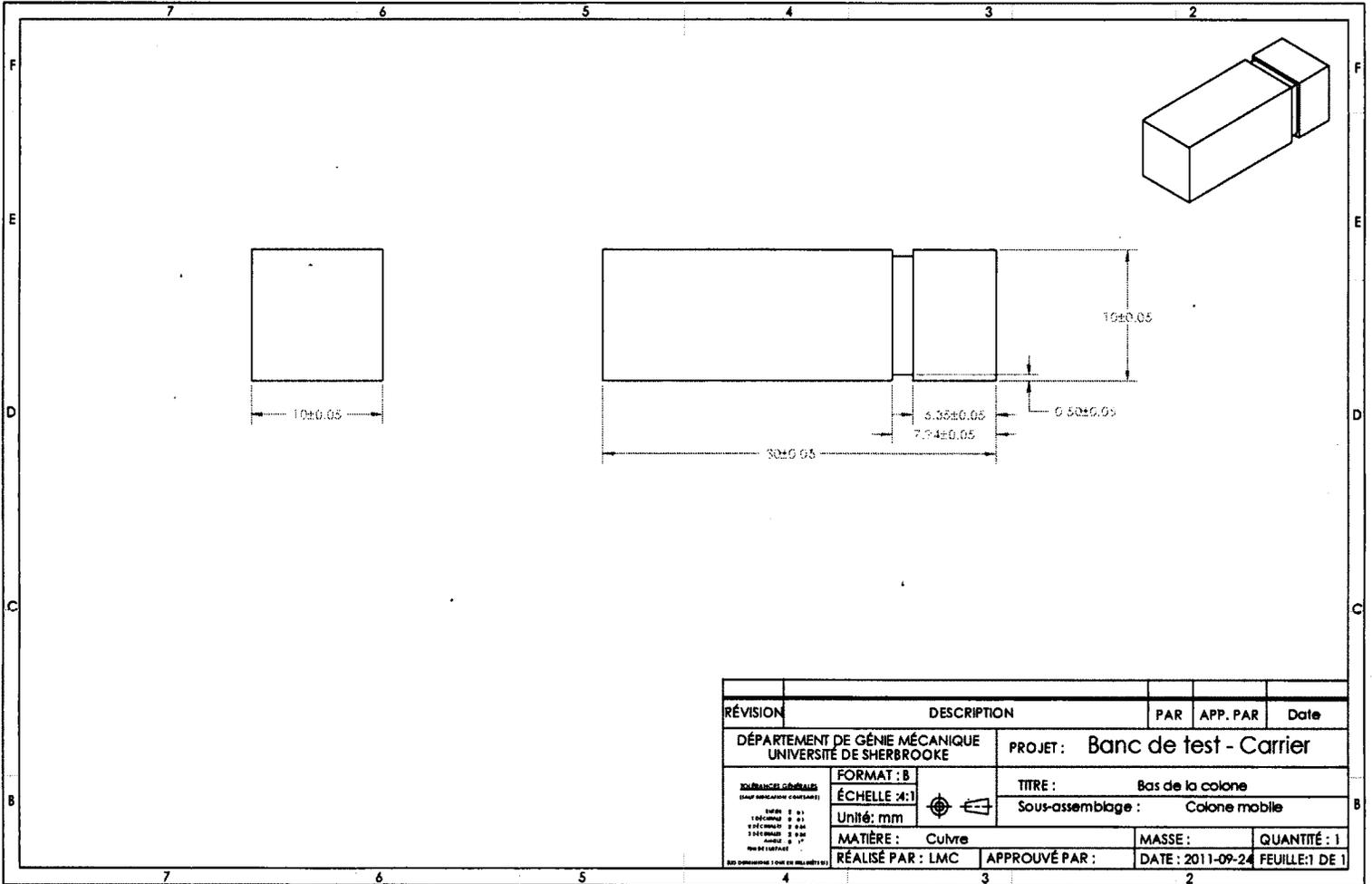


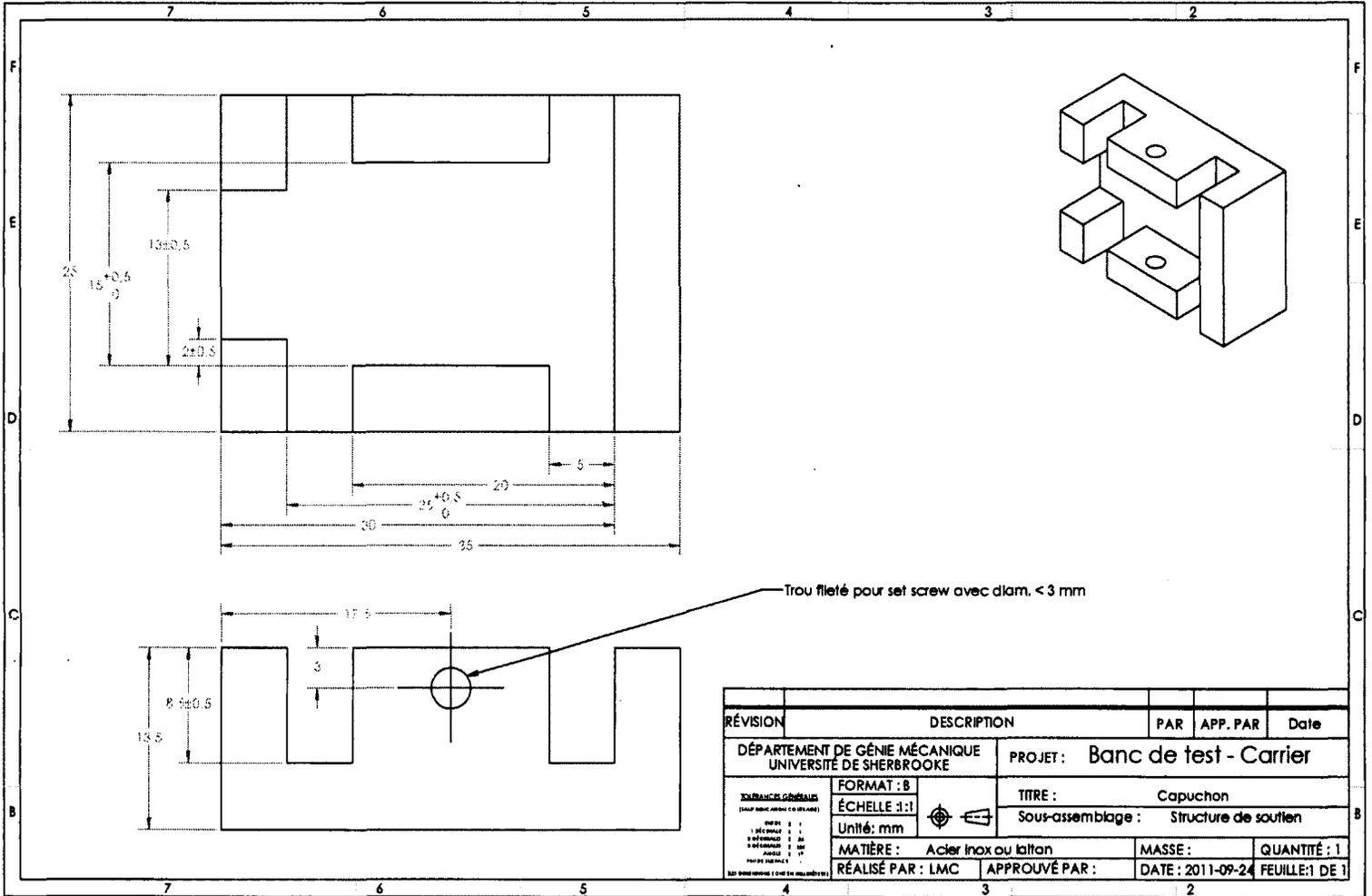
**TOLÉRANCES GÉNÉRALES**

(SAUF INDICATION CONTRAIRE)  
 x: ±0.5  
 x: ±0.1  
 x: ±0.05  
 ANGLE: ± 2°  
 FINI DE SURFACE: -  
 (LES DIMENSIONS SONT EN MILLIMÈTRES)

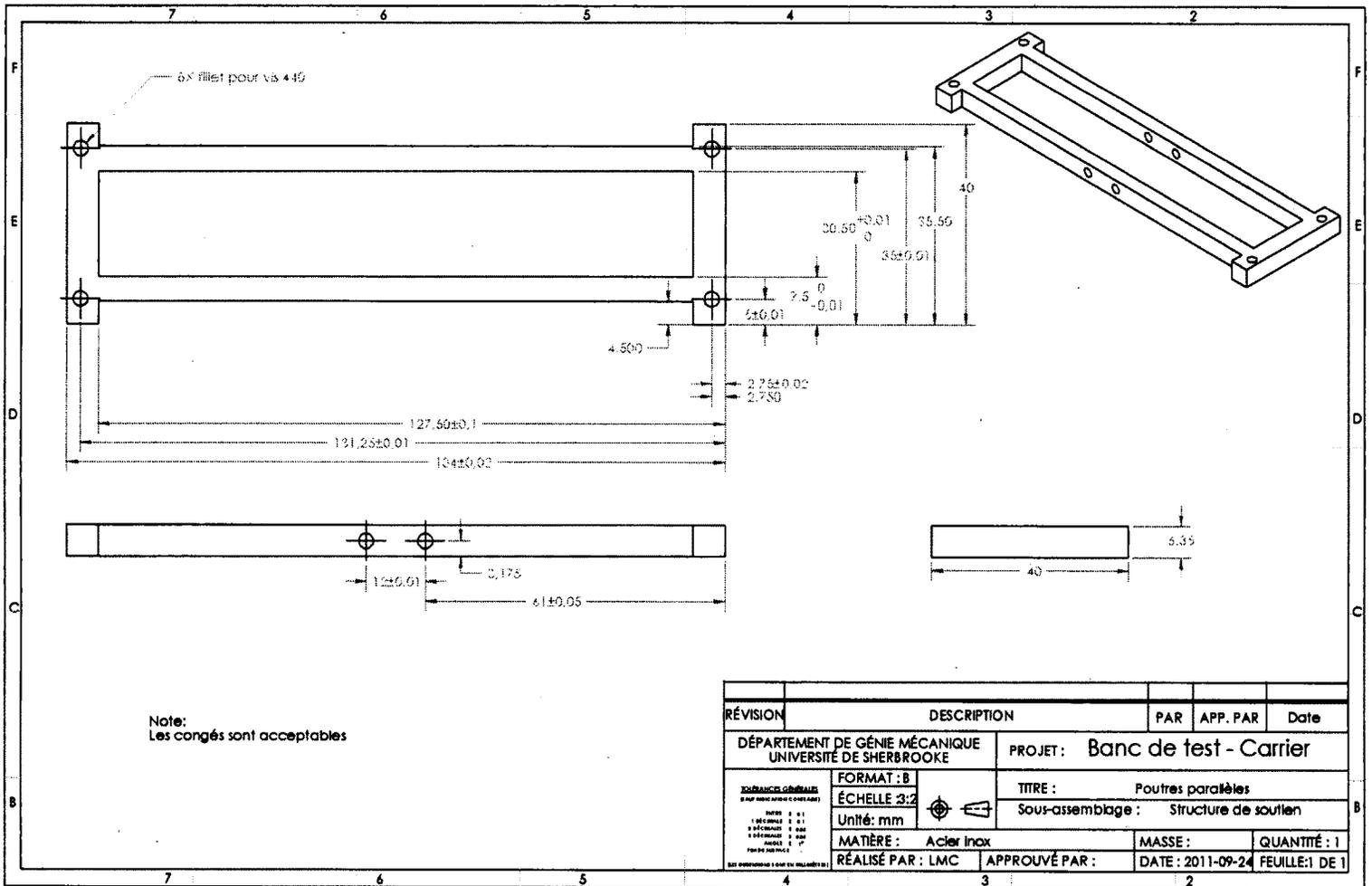
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

	QUANTITÉ : 1	TITRE : Colonne d'injection
	FORMAT : B	Sous-assembiage :
UNITÉ : mm	ÉCHELLE : 1:1	
MATIÈRE : Cuivre	RÉALISÉ PAR : LMC	DATE : 2011-09-24
		FEUILLE : 1 DE 1



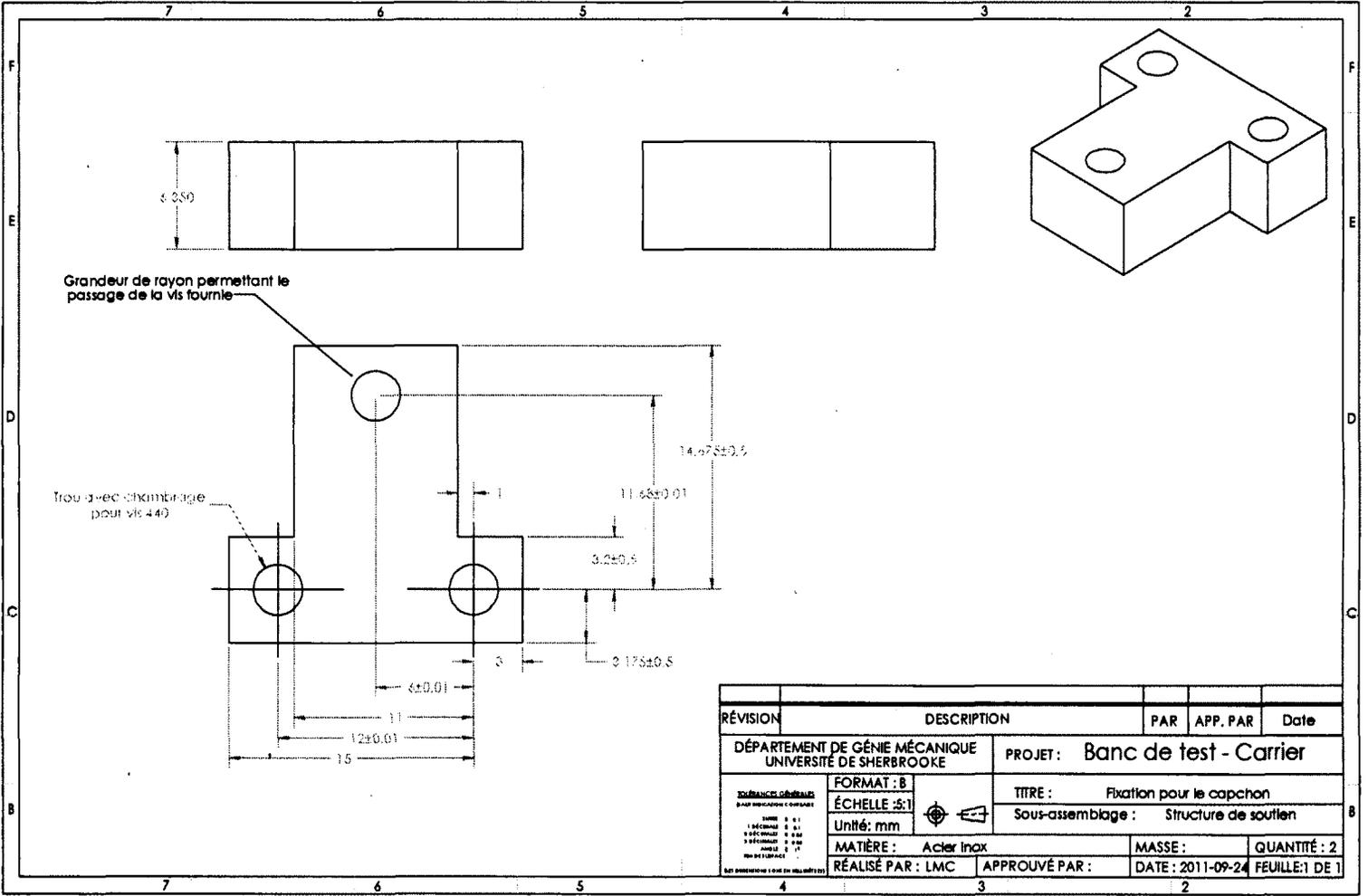


RÉVISION	DESCRIPTION	PAR	APP. PAR	Date
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE		PROJET: Banc de test - Carrier		
<small>           NORMES GÉNÉRALES            (SAUF INDICATION CONTRAIRE)            UNITÉ : mm            1 DÉCAIMMÉ : 10            2 CENTIMIMÉ : 100            3 MILLIMÈTRE : 1000            4 ANGLES : 1°            5 PROFILS : mm            6 RAYONS : mm            7 RAYONS : mm            8 RAYONS : mm            9 RAYONS : mm            10 RAYONS : mm         </small>		FORMAT : B ÉCHELLE : 1:1 Unité : mm	TITRE : Capuchon Sous-ensemble : Structure de soutien	
MATIÈRE : Acier inox ou laiton		MASSE :	QUANTITÉ : 1	
RÉALISÉ PAR : LMC	APPROUVÉ PAR :	DATE : 2011-09-24	FEUILLE: 1 DE 1	



Note:  
Les congés sont acceptables

RÉVISION	DESCRIPTION	PAR	APP. PAR	Date
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE		PROJET : Banc de test - Carrier		
<small>           TOLERANCES GÉNÉRALES            EN SAUF MENTION CONTRAIRE :            FINIS 0 ± 0.1            DÉCOUPÉ 0 ± 0.1            DÉBRASÉ 0 ± 0.1            ALÉSÉ 0 ± 0.05            PERÇÉ 0 ± 0.1            PERÇÉ À LA MAIN 0 ± 0.1         </small>		FORMAT : B ÉCHELLE 3:2 Unité : mm	TITRE : Poutres parallèles Sous-ensemble : Structure de soutien	
MATIÈRE : Acier Inox		MASSE :	QUANTITÉ : 1	
RÉALISÉ PAR : LMC		APPROUVÉ PAR :	DATE : 2011-09-24	FEUILLE:1 DE 1



RÉVISION	DESCRIPTION	PAR	APP. PAR	Date
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE		PROJET : Banc de test - Carrier		
<small>           TOUJOURS oblitérer            pour indication d'usage         </small>		FORMAT : B ÉCHELLE : 5:1 Unité : mm	TITRE : Fixation pour le capchon Sous-ensemble : Structure de soutien	
MATIÈRE : Acier Inox		MASSE :	QUANTITÉ : 2	
RÉALISÉ PAR : LMC		APPROUVÉ PAR :	DATE : 2011-09-24	FEUILLE 1 DE 1

# ANNEXE G

## Données brutes

Données brutes tirées des caractérisations de la plateforme et ayant servi pour la présentation de l'article au chapitre 3.

Échantillon : Sans échantillon								Caractérisation : Résistance série			
Test #	Élément	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	É eau (moy)	Puissance (élect)	Puissance (mesurée)	Résistance	Résistance échantillon
1	163,2	109,9	101,7	90,4	82,5	70,8	25		23,1	1,778	-
2	163,1	109,7	101,5	90,3	82,2	70,7	25	26,7	23,1	1,774	-
3	163,3	110,1	101,8	90,6	82,6	71	25		23	1,786	-
4	164,1	110,1	101,8	90,6	82,5	70,9	25	26,6	23,2	1,773	-
5	164,5	111,4	103,1	91,9	83,8	72,2	25	26,6	23,2	1,83	-
6	164,4	111,3	103	91,8	83,8	72,2	25		23,1	1,839	-
<b>Moyenne</b>										<b>1,797</b>	-

Échantillon : Acier Inox 3 cm X 3 cm (1/16" d'épaisseur)								Caractérisation : Résistance série			
Test #	Élément	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	É eau (moy)	Puissance (élect)	Puissance (mesurée)	Résistance	Résistance échantillon
1	180,5	129,8	122,4	111	104	91,8	24,9	26	22,2	2,822	2,822
2	180,7	130,1	122,6	111,3	104	91,7	24,9	26,1	22,4	2,793	2,793
3	181,6	131	123,5	112,1	104,4	92,5	24,8	26,1	22,5	2,824	2,824
4	178,4	128,3	120,7	109,3	102,1	89,9	24,9	26,2	22,5	2,701	2,701
5	180,5	129,7	122,2	110,9	103,7	91,5	24,9		22,3	2,79	2,790
6	180,3	129,6	122,1	110,8	103,5	91,3	24,9		22,4	2,771	2,771
<b>Moyenne</b>										<b>2,784</b>	<b>2,784</b>

Échantillon : Aluminium 3 cm X 3 cm (1/16" d'épaisseur)								Caractérisation : Résistance série			
Test #	Élément	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	É eau (moy)	Puissance (élect)	Puissance (mesurée)	Résistance	Résistance échantillon
1	170,1	118,1	110	98,8	90,9	79,1	24,9	26,4	23	2,16	2,160
2	170,4	118,5	110,4	99,1	91,3	79,5	24,9	26,4	23	2,177	2,177
3	170,1	118,7	110,7	99,4	91,7	80	25,1		22,8	2,209	2,209
4	171,9	119,9	111,8	100,6	92,8	81	25,2		22,9	2,241	2,241
5	171,8	120	111,8	100,5	92,8	?	25,2	26,4	23	2,23	2,230
6	170,9	119	111	99,7	92,1	80,4	25,1		22,8	2,23	2,230
<b>Moyenne</b>										<b>2,208</b>	<b>2,208</b>

Échantillon : Cuivre 3 cm X 3 cm (1/16" d'épaisseur)								Caractérisation : Résistance série			
Test #	Élément	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	É eau (moy)	Puissance (élect)	Puissance (mesurée)	Résistance	Résistance échantillon
1	170	117,1	109	97,8	90,1	78,4	25,2		22,8	2,136	2,136
2	171,1	118,7	110,5	99,2	91,4	79,6	25,2	26,4	23	2,166	2,166
3	172	119,2	111,1	99,8	92,2	80,5	25	26,4	22,8	2,24	2,240
4	171,7	119,6	111,5	100,3	92,4	80,7	25	26,4	22,9	2,229	2,229
5	172	119,9	111,9	100,8	92,9	81,2	25	26,4	22,8	2,265	2,265
6	171,2	118,9	110,9	99,6	91,9	80,2	25	26,5	22,8	2,217	2,217
<b>Moyenne</b>										<b>2,209</b>	<b>2,209</b>

Figure G.1 Données brutes des caractérisations en série des plaques

Échantillon : Sans échantillon											Caractérisation : Résistance globale	
Test #	Élément	I 1	I 2	I 3	I 4	I 5	I eau (moy)	Puissance (lect)	Puissance (mesurée)	Résistance	Résistance échantillon	
1	144,8	88,3	79,2	67,9	59,3	48,4	25	27,3	23,9	0,756	-	
2	144,8	88,5	79,3	68,1	59,3	48,4	25	27,4	24	0,752	-	
3	146	89,9	80,7	69,5	60,7	49,7	25	27,2	24,1	0,806	-	
4	146,5	90,3	81,2	70	61,2	50,1	25	27,3	24,1	0,826	-	
5	145,3	89,1	79,8	68,6	59,7	48,7	25	27,3	24,2	0,762	-	
6	146,6	90,5	81,3	70,1	61,3	50,2	25	?	24,1	0,829	-	
<b>Moyenne</b>										<b>0,789</b>	-	

Échantillon : Acier Inox 3 cm X 3 cm (1/16" d'épaisseur)											Caractérisation : Résistance globale	
Test #	Élément	I 1	I 2	I 3	I 4	I 5	I eau (moy)	Puissance (lect)	Puissance (mesurée)	Résistance	Résistance échantillon	
1	173,1	120,3	112,4	101	93,6	81,5	24,9	26,4	22,8	2,291	1,503	
2	174,6	122,3	114,4	103,1	95,6	83,3	24,9	2,3	22,8	2,367	1,579	
3	169,3	117	108,9	97,7	89,8	77,8	24,9	26,5	23,1	2,091	1,303	
4	170,7	118,1	110,1	98,8	91,1	79	26,4	23	23	2,156	1,368	
5	168,2	115	106,9	95,6	87,9	76	24,9	26,5	23	2,021	1,233	
6	172,5	119,9	112	100,6	93,1	81	24,9	26,4	22,9	2,26	1,472	
<b>Moyenne</b>										<b>2,198</b>	<b>1,409</b>	

Échantillon : Cuivre 3 cm X 3 cm (1/16" d'épaisseur)											Caractérisation : Résistance globale	
Test #	Élément	I 1	I 2	I 3	I 4	I 5	I eau (moy)	Puissance (lect)	Puissance (mesurée)	Résistance	Résistance échantillon	
1	148,2	92,5	83,4	72,2	63,5	52,4	25	27,2	24	0,922	0,922	
2	148,1	92,6	83,5	72,3	63,5	52,4	25	27,2	24	0,925	0,925	
3	147,2	91,4	82,3	71,1	62,3	51,2	25	27,3	24,1	0,868	0,868	
4	146,7	91,2	82	70,7	62	51	25,1	27,3	24	0,859	0,859	
5	148,8	93	83,9	72,7	64	52,9	25	27,2	24	0,938	0,938	
6	147,6	91,7	82,6	71,4	62,6	51,6	25,1	27,3	24	0,879	0,879	
<b>Moyenne</b>										<b>0,899</b>	<b>0,899</b>	

Échantillon : Aluminium 3 cm X 3 cm (1/16" d'épaisseur)											Caractérisation : Résistance globale	
Test #	Élément	I 1	I 2	I 3	I 4	I 5	I eau (moy)	Puissance (lect)	Puissance (mesurée)	Résistance	Résistance échantillon	
1	146,5	90,5	81,5	70,2	61,7	50,7	25	27,3	23,8	0,858	0,858	
2	91	81,9	70,6	61,9	50,9	50,9	25	27,3	24	0,858	0,858	
3	146,8	91,2	82,1	70,9	62,1	51,1	25	27,3	24	0,867	0,867	
4	146,7	91,1	82	70,8	62	50,9	25	27,3	24	0,862	0,862	
5	146,1	90,5	81,4	70,2	61,5	50,4	25	27,3	24	0,839	0,839	
6	147,9	92,5	83,5	72,3	63,5	52,5	25	27,3	23,9	0,928	0,928	
<b>Moyenne</b>										<b>0,869</b>	<b>0,869</b>	

Figure G.2 Données brutes des caractérisations globales des plaques

Échantillon : Carrièr alumine										Caractérisation : Résistance série	
1	173,8	121,1	113,3	102	94,4	82,6	25	26,4	22,7	2,346	0,549
2	173,7	121,4	113,4	102,3	94,6	82,6	25	26,2	22,8	2,333	0,536
3	172,7	120,6	112,6	101,5	93,6	81,7	25,2		22,9	2,273	0,476
Moyenne										2,317	0,521

Échantillon : Carrièr Cuivre-alumine										Caractérisation : Résistance série	
1	173,3	121	113,1	101,8	94,2	82,5	25		22,6	2,34	0,543
2	173,6	121,7	113,8	102,7	95	83,2	25		22,6	2,373	0,576
3	172,7	120,6	112,6	101,5	93,6	81,7	25,2		22,9	2,273	0,476
Moyenne										2,329	0,532

Échantillon : Carrièr Cuivre seul										Caractérisation : Résistance série	
1	171,6	119,1	111,1	99,8	92	80,3	25		22,9	2,216	0,419
2	170,6	118,1	110,1	99	91,1	79,3	25		22,8	2,179	0,382
3	171,4	119,3	111,2	100,1	92,3	80,5	25,2	26,4	22,8	2,224	0,427
Moyenne										2,206	0,410

Échantillon : Carrièr Cuivre-époxy										Caractérisation : Résistance série	
1	172,2	121,3	113,3	102,1	94,6	82,5				2,336	0,539
2	174,9	122,9	115,1	104	96,4	84,6	25,1		22,5	2,446	0,650
3	175,7	123,9	116	104,9	97,3	85,5	25,2		22,6	2,474	0,677
Moyenne										2,419	0,622

Échantillon : Carrièr Aluminium										Caractérisation : Résistance série	
1	170,7	118,2	110,1	98,9	91	79,3	25		22,9	2,172	0,375
2	171,1	118,5	110,4	99,28	91,4	79,6	25,1		22,9	2,186	0,389
3	170,1	117,6	109,6	98,3	90,6	78,9	24,9	26,4	22,9	2,159	0,363
Moyenne										2,172	0,376

Échantillon : Carrièr cuivre-alumine (Inversé)										Caractérisation : Résistance série	
1	172,9	120,9	113	101,9	94,2	82,4	25		22,63	2,34	0,543
2	174	121,7	113,8	102,7	95	83,1	25		22,68	2,368	0,571
3	173	120,8	112,5	101,7	94	82,1	25,9		22,7	2,319	0,523
Moyenne										2,342	0,546

Figure G.3 Données brutes des caractérisations en série des récepteurs

Échantillon : Carrier Alumine								Caractérisation : Résistance globale		
1	154,4	100,4	91,5	80,3	71,8	60,4	25	23,7	1,285	0,497
2	154,2	98,7	90	78,9	70,4	59,1	24,9	23,6	1,234	0,445
3	154	98,7	89,9	78,8	70,3	58,9	24,9	23,7	1,222	0,433
<b>Moyenne</b>									<b>1,247</b>	<b>0,458</b>

Échantillon : Carrier cuivre-alumine								Caractérisation : Résistance globale			
1	148,5	93,2	84,2	73	64,2	53	25	27,2	24	0,95	0,162
2	148,9	92,9	83,8	72,8	63,9	52,7	24,9	24	24	0,944	0,155
3	150,1	93,9	85	73,9	53,1	53,9	24,9	24,9	23,9	1,000	0,211
<b>Moyenne</b>										<b>0,964</b>	<b>0,176</b>

Échantillon : Carrier cuivre seul								Caractérisation : Résistance globale		
1	145,2	89,9	80,8	69,5	60,8	49,9	25	24	0,816	0,028
2	148	91,8	82,8	71,7	62,9	51,7	24,9	24	0,904	0,115
3	147	91,3	82,2	71,1	62,3	51,1	24,9	24	0,876	0,088
<b>Moyenne</b>									<b>0,865</b>	<b>0,077</b>

Échantillon : Carrier cuivre-époxy								Caractérisation : Résistance globale		
3	148	92,8	83,7	72,6	63,7	52,5			0,926	0,138
2	149,6	93,7	84,6	73,5	64,7	53,5	24,9		0,977	0,188
3	149,6	93,8	84,8	73,7	65	53,8	24,9	23,9	0,994	0,205
<b>Moyenne</b>									<b>0,965</b>	<b>0,177</b>

Échantillon : Carrier aluminium								Caractérisation : Résistance globale			
1	148,4	93	84,1	72,9	64,1	53	25	27,2	23,9	0,953	0,165
2	150,5	94,8	85,8	74,7	66	54,7	24,9		23,8	1,032	0,244
3	150,7	95	86,1	75	66,3	55	24,9		23,8	1,050	0,262
<b>Moyenne</b>										<b>1,012</b>	<b>0,223</b>

Échantillon : Carrier cuivre-alumine (Inversé)								Caractérisation : Résistance globale			
1	149,8	94,8	85,9	74,7	66,1	54,9				1,037	0,249
2	151,3	95,2	86,2	75,2	66,4	55,2	25		23,9	1,050	0,261
3	152,2	96,6	87,7	76,7	68	56,7	25		23,8	1,120	0,332
<b>Moyenne</b>										<b>1,069</b>	<b>0,280</b>

Figure G.4 Données brutes des caractérisations globales des récepteurs



# ANNEXE H

## Calcul des incertitudes

Cet annexe traite des incertitudes déterminées par calcul sur la plateforme.

### H.1 Méthodologie

Le calcul des incertitudes est établi à partir d'un cas référence. Ce cas est la caractérisation globale d'un récepteur cuivre-alumine, tel qu'utilisé dans l'article présenté au chapitre 3. La résistance obtenue par cette caractérisation est de  $0.950 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$  et est considérée comme la valeur nominale.

On détermine ensuite les incertitudes présentes sur différents aspects de la plateforme. Or, calculer analytiquement l'impact de la variation de ces métriques est relativement complexe. Une autre technique est donc utilisée, soit recalculer la résistance en faisant varier les paramètres de leur incertitude respective. Les variations selon l'incertitude sont effectués à tour de rôle afin de définir l'impact de chaque paramètre sur l'incertitude de la résistance. On observe alors les variations obtenues sur la nouvelle résistance pour l'incertitude ajoutée et celle retranchée. On effectue ensuite ces mêmes opérations sur le paramètre suivant, en reprenant la valeur nominale du paramètre précédemment modifié.

Un exemple de ce calcul d'incertitude est le suivant :

On identifie d'abord un paramètre, soit l'aire de la colonne qui possède nominalelement  $1 \text{ cm}^2$ . Selon les spécifications d'usinage, cette aire peut varier de  $\pm 2 \text{ mm}^2$ . On utilise alors l'aire additionnée de son incertitude, soit  $1.02 \text{ cm}^2$ . La résistance calculée avec cette nouvelle aire est de  $0.9317 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$ . On lui soustrait la valeur nominale de la résistance, pour obtenir  $0.998 \text{ cm}^2$ . Avec cette valeur, la résistance thermique est de  $0.9697 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$ . On répète cette procédure pour l'ensemble des paramètres dont les incertitudes sont considérées non-négligeables.

On procède autrement dans le cas des incertitudes liées au calcul de la pente par les cinq capteurs de température sur la colonne. On varie à tour de rôle chacune des mesures de températures selon les extrêmes de sa plage d'incertitude. La résistance maximale et minimale de l'ensemble des variations est sélectionnée comme étant l'incertitude sur la température de la colonne. Utiliser cinq données pour calculer le gradient sur le long de la colonne permet de réduire en pratique l'erreur. Il est donc plausible de croire que l'incertitude trouvée est plus grande que l'incertitude réelle.

Enfin, l'incertitude totale  $I_t$  est calculée par l'addition de toutes les valeurs de résistance supérieures  $R_{sup}$  à la résistance nominale  $R_n$ . On soustrait le résultat par la valeur nominale  $R_n$  fois le nombre de mesures  $n_m$  utilisées. On répète la même opération pour les valeurs inférieures à la résistance nominale  $R_{inf}$ . La soustraction des valeurs obtenues

donne l'étendue  $E$  de l'incertitude totale. Si la valeur nominale est située à la moitié de l'étendue  $E$ , on conclut que  $I_t = E/2$ . Sous une formulation mathématique, on obtient donc :

$$I_t = \frac{\sum R_{sup} - n_m R_n - (n_m R_n - \sum R_{inf})}{2} \quad (H.1)$$

## H.2 Incertitudes

Voici les incertitudes répertoriées :

- **Conductivité thermique de la colonne d'injection** :  $\pm 2 \%$ \*  
Justification : Tolérance inspirée de la norme ASTM E1225 - 09, utilisant le cuivre de manufacture comme matériel de référence. Une incertitude est fixée sur la conductivité thermique du cuivre.  
Résistances obtenues : (+) 0.9697 (-) 0.9317  $\frac{^{\circ}C}{W}$
- **Aire de la section de la colonne d'injection** :  $\pm 0.2 \text{ mm}^2$   
Justification : Tolérances d'usinage  
Résistances obtenues : (+) 0.9697 (-) 0.9317  $\frac{^{\circ}C}{W}$
- **Distance entre les capteurs de la colonne d'injection** :  $\pm 0.1 \text{ mm}$   
Justification : Tolérances d'usinage  
Résistances obtenues : (+) 0.9522 (-) 0.9484  $\frac{^{\circ}C}{W}$
- **Précision des thermocouples de la colonne d'injection** :  $\pm 1.1 \text{ }^{\circ}C$   
Justification : Précision pour le type de thermocouple, soit des types « T » avec limites spéciales d'erreur  
Résistances obtenues : (+) 0.9974 (-) 0.9073  $\frac{^{\circ}C}{W}$
- **Précision du RTD d'entrée d'eau** :  $\pm 0.2 \text{ }^{\circ}C$   
Justification : Précision pour les RTDs selon la norme DIN-EN-60751  
Résistances obtenues : (+) 0.9545 (-) 0.9462  $\frac{^{\circ}C}{W}$
- **Précision du RTD de sortie d'eau** :  $\pm 0.2 \text{ }^{\circ}C$   
Justification : Précision pour les RTDs selon la norme DIN-EN-60751  
Résistances obtenues : (+) 0.9545 (-) 0.9462  $\frac{^{\circ}C}{W}$

\*Note : Le pourcentage est appliqué sur les coefficients représentant la conductivité thermique. Ces coefficients,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ , sont présentés à la sous-section 3.5.2.

En utilisant l'équation du calcul de l'incertitude globale H.1 avec les valeurs précédemment trouvées, on obtient une variation maximale de 0.093  $\frac{^{\circ}C}{W}$  par rapport à  $R_n$ , soit une incertitude globale de moins de  $\pm 0.1 \frac{^{\circ}C}{W}$ . Par cette méthode, nous obtenons une incertitude plus petite que par les dérivées partielles présentée à la sous-section 3.6.1 ( $\pm 0.14 \frac{^{\circ}C}{W}$ ). Donc, par réserve, la méthode des dérivées partielles sera celle retenue pour le calcul de l'incertitude.

# ANNEXE I

## Guide d'utilisation

Ce guide d'utilisation présente l'ensemble des manipulations nécessaires pour opérer la plateforme de caractérisation.

### I.1 Mises en garde

Afin d'éviter les bris d'équipement, il est essentiel de suivre cette séquence d'ouverture :

- Activer le thermorégulateur Huber<sup>®</sup> et fixer sa température à 25 °C.
- Activer refroidisseur CP-36 près de sa puissance maximale.
- CONFIRMER QUE LA COLONNE D'INJECTION EST EN CONTACT THERMIQUE AVEC LE SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT.
- Activer ensuite seulement l'élément chauffant.

Pour éteindre la plateforme, la séquence suivante doit être suivie :

- ÉTEINDRE L'ÉLÉMENT CHAUFFANT AVANT TOUTE AUTRE OPÉRATION.
- Éteindre le refroidisseur CP-36.
- Éteindre le thermorégulateur Huber<sup>®</sup>

### I.2 Branchements

L'élément chauffant est branché à une source de tension. Pour vérifier la stabilité et la puissance du système, un voltmètre et un ampèremètre sont branchés tels que présentés à la figure I.1.

Pour le réseau de l'eau de refroidissement, il s'agit d'un système de refroidissement en boucle fermée. L'eau est d'abord chauffée et propulsée par le thermorégulateur Huber<sup>®</sup>. Cette eau est alors introduite dans le système de refroidissement pour évacuer la chaleur injectée dans l'échantillon. Enfin, l'eau passe au travers du refroidisseur thermoélectrique CP-36 pour éliminer l'excédent de chaleur avant de retourner au thermorégulateur. Ce branchement est représenté à la figure I.2.

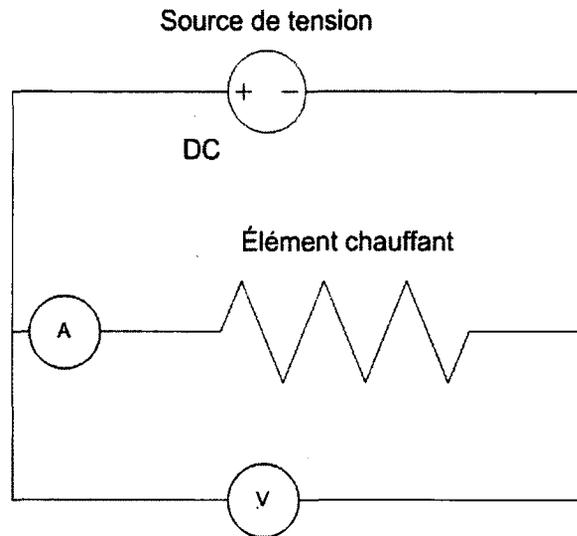


Figure I.1 Branchement de l'élément chauffant avec la source de tension, le voltmètre et l'ampèremètre

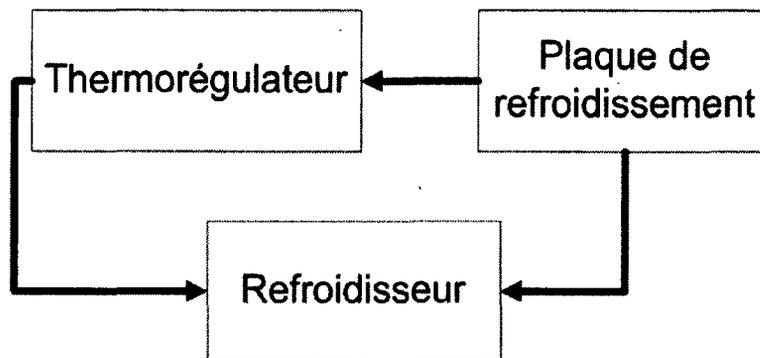


Figure I.2 Circuit emprunté par le fluide de refroidissement

## I.3 Programme - interface utilisateur

Cette section traite des différentes fonctionnalités disponibles via l'interface de l'utilisateur du programme d'acquisition. La structure est présentée à l'annexe E. La figure I.3 présente ses composantes.

### ***Acquisition***

La première section se nomme *Acquisition* et est située dans le coin supérieur gauche. La case du haut permet de fixer le temps d'intégration des mesures des thermocouples de la colonne. Plus le temps est élevé et moins la lecture fluctue. Cependant, l'intervalle de temps entre les mesures augmente, car les mesures sont moyennées dans le temps. Réduire cette valeur produit l'effet inverse.

La case du milieu a essentiellement la même fonction que la case du haut, mais est destinée aux capteurs RTDs. Plus la valeur est élevée et moins les fluctuations parasites sont importantes. Cela ralentit cependant l'acquisition de nouvelles mesures.

La case du bas permet de fixer un délai de temps entre deux acquisitions.

### ***Polynomial Fit***

Cette section traite du critère confirmant que la plateforme est en régime permanent. La case supérieure gauche fixe la pente d'une droite estimée à partir des dernières mesures de chaque capteurs. Lorsque tous les capteurs ont une pente inférieure en absolu à la valeur inscrite, le programme procède à l'analyse des données.

La case du dessous fixe le nombre de points à partir des dernières mesures. Ces points sont ceux utilisés pour calculer le critère de la pente.

La série de valeurs affichées au centre de la section correspond à la pente calculée pour chacun des capteurs. Ces valeurs sont actualisées à chaque lecture des capteurs. Une série de lumières à la droite de ces valeurs confirme visuellement si la condition est atteinte.

### ***Analysis***

Cette section détermine le type de caractérisation que l'on désire effectuer, soit en série ou global. Les cases à gauche permettent l'inscription des résistances « à vide » du type désiré. Le commutateur détermine le type de caractérisation qui sera utilisé. La case doit cependant rester vide lorsque l'on performe une caractérisation « à vide ».

### ***Résults***

Cette section présente les mesures et les résultats issus de l'analyse. La série de valeurs au centre de cette case correspond aux dernières mesures de températures des capteurs de la plateforme. Les cases à droite correspondent à des valeurs issues de l'analyse des résultats et sont calculées à la fin de l'acquisition. De haut en bas, ces cases expriment :

- La température moyenne de l'eau. Celle-ci est prise à l'aide des températures d'entrée et de sortie dans le système de refroidissement.
- Le flux thermique présent dans la colonne d'injection. Ce résultat est calculé à partir des données de température dans la colonne et des propriétés de cette colonne.

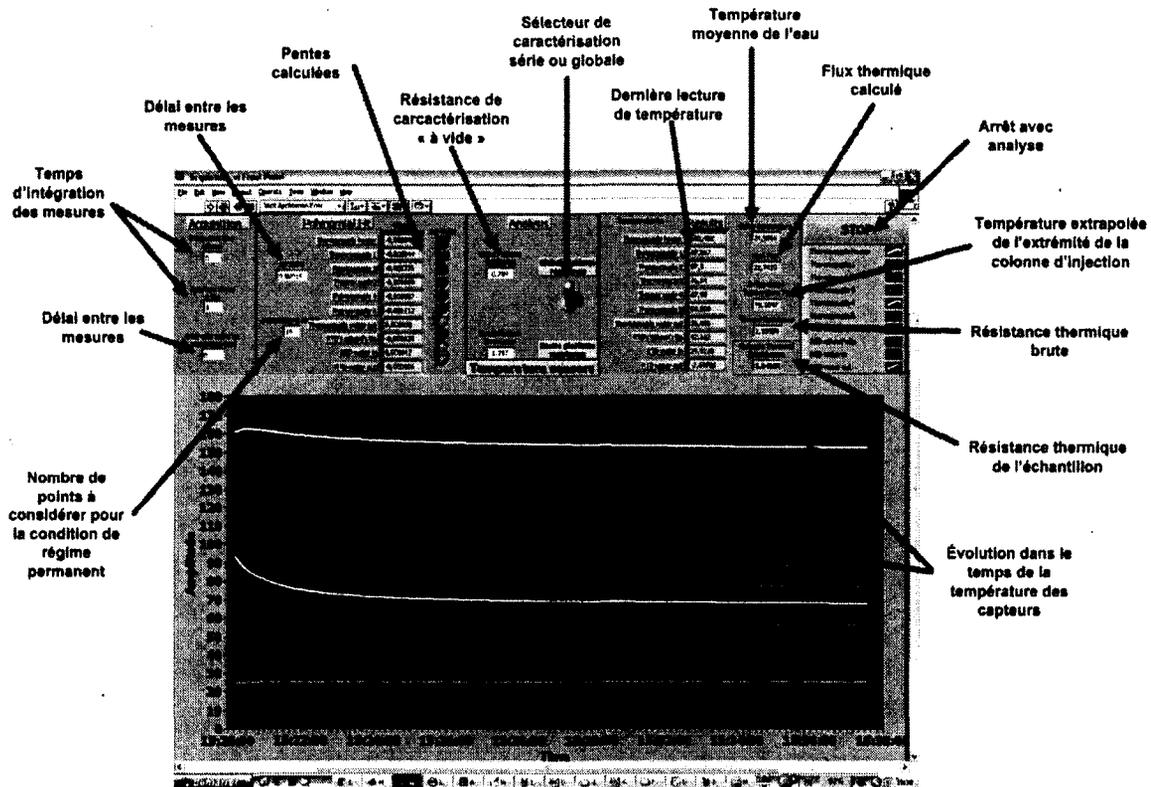


Figure I.3 Interface de l'utilisateur

- La température de l'extrémité de la colonne d'injection en contact avec le récepteur. Cette valeur est extrapolée.
- La résistance thermique entre l'extrémité de la colonne et l'eau de refroidissement (température moyenne de l'eau).
- La résistance thermique du récepteur lorsque la résistance de la caractérisation « à vide » a été soustraite. (sauf lorsqu'il s'agit de la caractérisation « à vide » qui est exécutée)

### *Temperature Sensors*

Il s'agit de l'ensemble des mesures de températures des capteurs de la plateforme présentées en fonction du temps. La légende explicative est située dans le coin supérieur droit de l'interface.

## I.4 Caractérisation globale

Avant de caractériser un échantillon, il est essentiel de réaliser un « test à vide » tel que présenté dans la section A.3. Les étapes étant sensiblement les mêmes qu'une caractérisation avec échantillon, il suffit de suivre la même démarche. Les étapes présentées sont pour les deux scénarios, soit le test avec échantillon et le test « à vide ». Pour certaines étapes de la caractérisation « à vide », il faut suivre les instructions précédées de : **Pour**

**test « à vide »** au lieu d'exécuter la consigne régulière. Pour réaliser une caractérisation globale, il faut réaliser les étapes suivantes :

1. Ouvrir sous LabVIEW® le programme \ Acquisition température\ Acquisition.vi présent à partir du bureau du portable attitré à la plateforme.
2. Activer le système d'acquisition Agilent 34970A, présenté à la figure I.4 et s'assurer que son câble, le 82357A GPIB/USB, est bien branché à l'ordinateur.



Figure I.4 Activation du système d'acquisition de données

3. Activer le VI d'acquisition, tel que présenté à la figure I.5, et s'assurer que l'option *Global platform resistance* dans la section *Analysis* est choisie. Confirmer que la valeur insérée pour la résistance de la plateforme sous *Global Platform Resistance* est adéquate.

**Pour test « à vide » :** Activer le programme Acquisition.vi, tel que présenté à la figure I.5, et s'assurer que l'option *Global platform resistance* dans la section *Analysis* est choisie. Insérer une valeur nulle pour la résistance de la plateforme sous *Global Platform Resistance*.

4. Activer le thermorégulateur Huber®, tel que présenté à la figure I.6, et vérifier que la température de régulation est fixée à 25 °C.
5. Activer l'alimentation du refroidisseur CP-36 à 24 V tel que présenté à la figure I.7.
6. Installer le récepteur selon les étapes présentées à la figure I.8 et décrites comme suit :
  - a. S'assurer que l'injecteur soit bien levé et que le système de refroidissement soit propre.
  - b. Couvrir d'un morceau de TIM *Tpli*<sup>TM</sup> 210 la surface du système de refroidissement. Cela, de sorte que la surface inférieure du récepteur puisse entièrement être couverte. Le TIM doit être centré par rapport à la colonne d'injection.

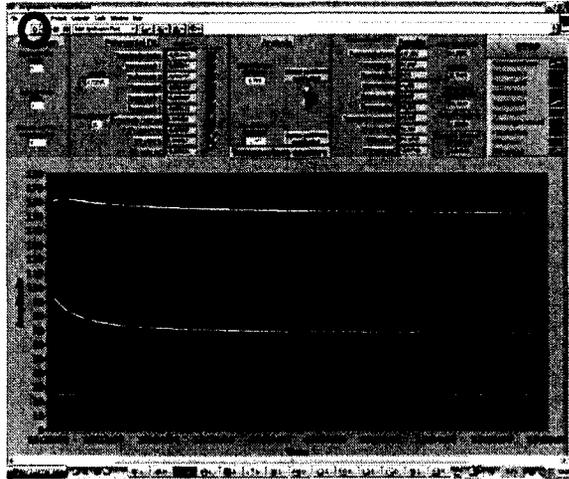


Figure I.5 Activation du programme d'acquisition de données

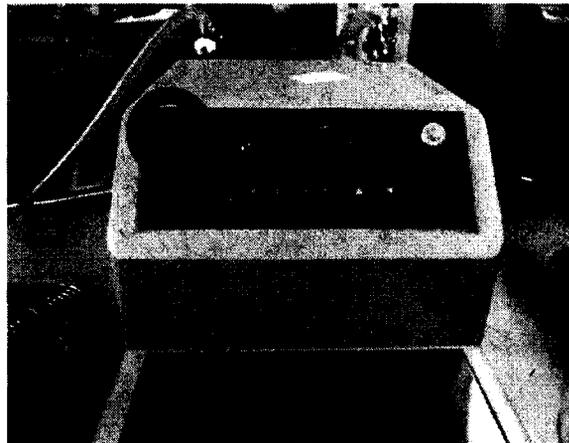


Figure I.6 Activation du thermorégulateur

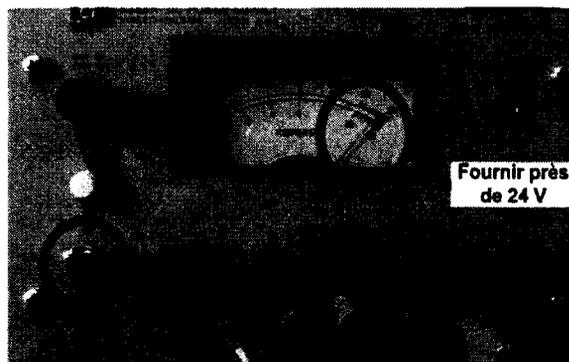


Figure I.7 Activation du refroidisseur

**Pour test « à vide » :** Couvrir d'un morceau de TIM *Tpli<sup>TM</sup>* 210 la surface du système de refroidissement. Cela, de sorte que l'extrémité de la colonne puisse entièrement être couverte. Le TIM doit être centré par rapport à la colonne d'injection.

c. Déposer le récepteur sur le TIM, de sorte qu'il soit centré avec la colonne d'injection.

**Pour test « à vide » :** Ignorer cette étape.

d. Déposer le second TIM sur le récepteur, aligné avec la colonne d'injection.

**Pour test « à vide » :** Ignorer cette étape.

e. Abaisser la colonne d'injection en dévissant les écrous papillons du bas (les autres écrous papillons sont destinés à l'alignement de l'injecteur). Conserver les mains sur les écrous pour toute la descente de l'injecteur.

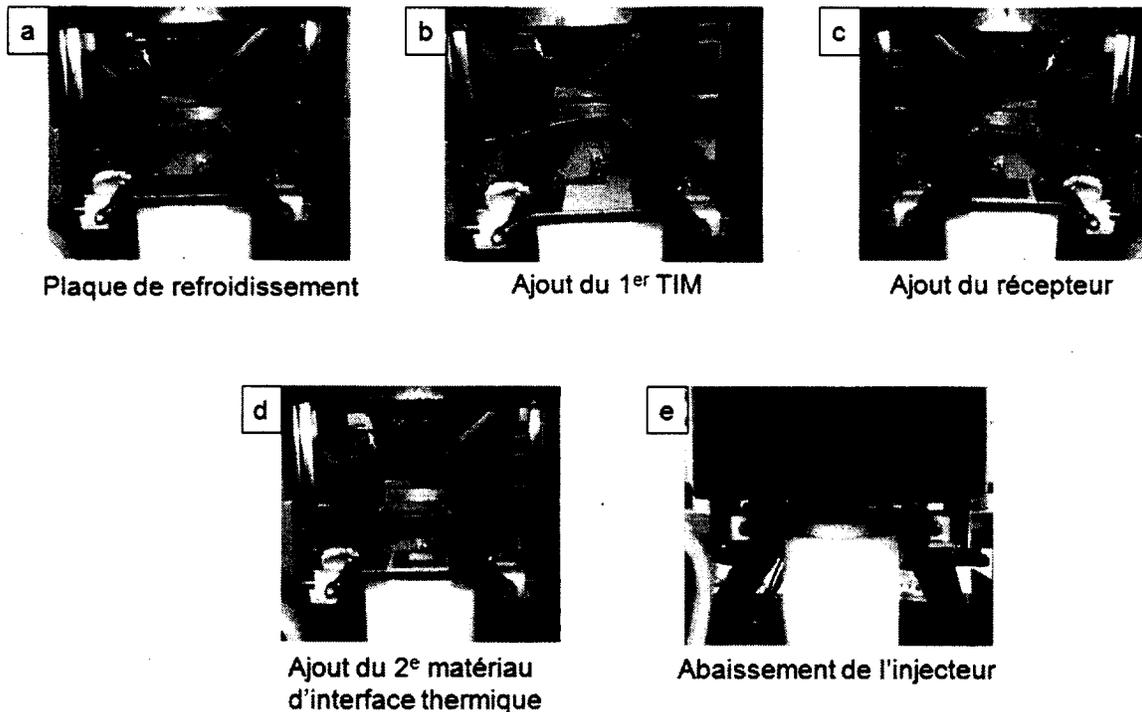


Figure I.8 Installation du récepteur pour caractérisation globale

7. Ajouter la masse sur l'injecteur tel que présenté à la figure I.9.
8. S'assurer que les contacts entre surfaces sont bien effectués en pesant sur l'injecteur et en le tournant.
9. Ouvrir la source de tension, tel que présenté à la figure I.10, pour produire environ de 25 W à 30 W. La lecture en puissance se fait à l'aide des ampèremètre et voltmètre.
10. Attendre la fin de l'acquisition.

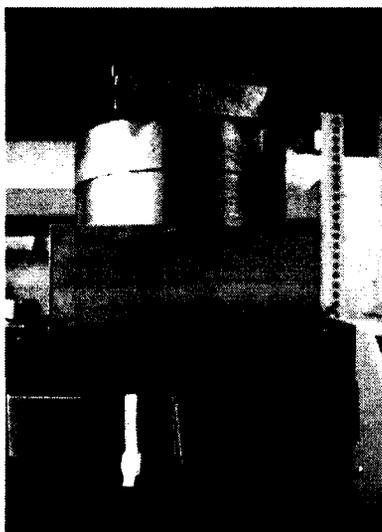


Figure I.9 Masse à ajouter sur l'injecteur



Figure I.10 Activation de la colonne d'injection

11. Vérifier que l'acquisition ne présente pas d'irrégularités. Répéter l'acquisition au besoin. (Il est toujours conseillé de répéter l'acquisition pour valider la stabilité du résultat)
12. Récupérer la résistance thermique, tel qu'identifié à la figure I.19, et les autres données pertinentes.
13. Fermer l'injecteur de chaleur.
14. Enlever les poids de sur l'injecteur.
15. Remonter la colonne par les écrous inférieurs de l'injecteur.
16. **Pour test « à vide »** : Transcrire la valeur de la case *Sample Thermal Resistance* dans la case *Global Platform Resistance*.

À ce point, si l'on désire poursuivre avec la caractérisation d'un autre récepteur, on exécute :

- Enlever le récepteur précédemment caractérisé
- Recommencer à l'étape 5.

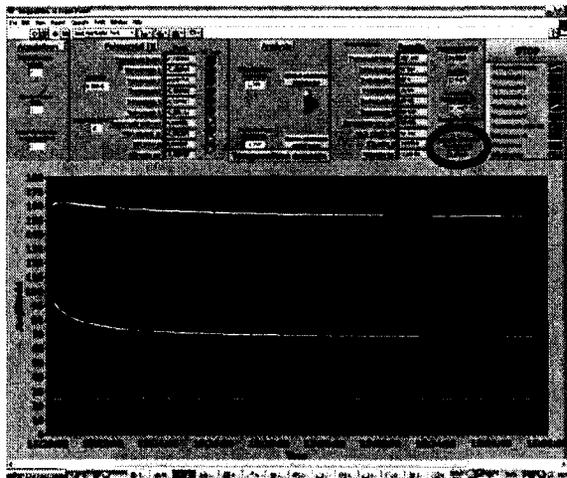


Figure I.11 Acquisition de la résistance thermique de l'échantillon

Si l'on désire terminer la caractérisation d'échantillon, on exécute dans cet ordre :

- Fermer le refroidisseur
- Fermer le thermorégulateur

## I.5 Caractérisation en série

Avant de caractériser un échantillon, il est essentiel de réaliser un « test à vide » tel que présenté dans à la section A.3. Les étapes étant sensiblement les mêmes qu'une caractérisation avec échantillon, il suffit de suivre la démarche de cette dernière. Les étapes présentées ci-contre sont pour les deux scénarios, soit le test avec échantillon et le test « à vide ». Pour certaines étapes de la caractérisation « à vide », il faut suivre les instructions précédées de : **Pour test « à vide »** au lieu d'exécuter la consigne régulière. Pour réaliser une caractérisation en série, on exécute les étapes suivantes :

1. Ouvrir sous LabVIEW® le programme \ Acquisition température\ Acquisition.vi présent à partir du bureau du portable attitré à la plateforme.
2. Activer le système d'acquisition Agilent 34970A, tel que présenté à la figure I.12, et s'assurer que son câble, le 82357A GPIB/USB, est bien branché à l'ordinateur.
3. Activer le VI d'acquisition, tel que présenté à la figure I.13, et s'assurer que l'option *Series platform resistance* dans la section *Analysis* est choisie. Confirmer que la valeur insérée pour la résistance de la plateforme sous *Series Platform Resistance* est adéquate.

**Pour test « à vide »** : Activer le VI d'acquisition, tel que présenté à la figure I.13, et s'assurer que l'option *Series platform resistance* dans la section *Analysis* est choisie. Insérer une valeur nulle pour la résistance de la plateforme sous *Series Platform Resistance*.

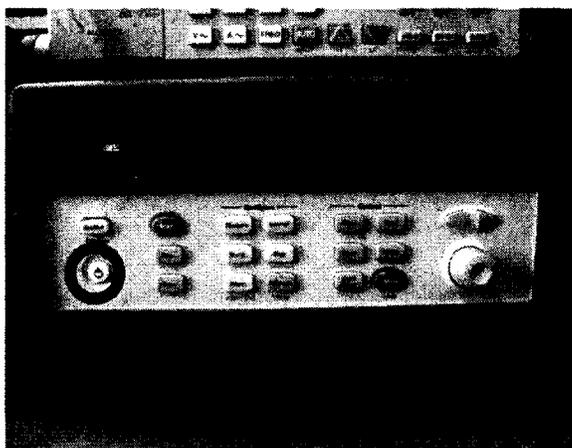


Figure I.12 Activation du système d'acquisition de données

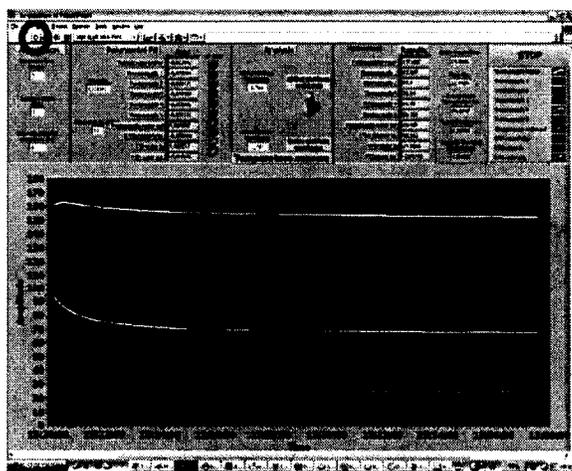


Figure I.13 Activation du programme d'acquisition de données

4. Activer le thermorégulateur Huber<sup>®</sup>, tel que présenté à la figure I.14, et vérifier que la température de régulation est fixée à 25 °C.



Figure I.14 Activation du thermorégulateur

5. Activer l'alimentation du refroidisseur CP-36 à 24 V tel que présenté à la figure I.15.

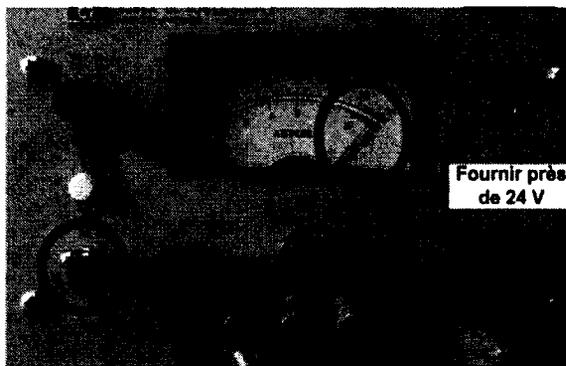


Figure I.15 Activation du refroidisseur

6. Installer le récepteur selon les étapes présentées à la figure I.16 et décrites comme suit :
  - a. S'assurer que l'injecteur soit bien levé et que le système de refroidissement soit propre.
  - b. Couvrir d'un morceau de TIM *Tpli 210<sup>TM</sup>* la surface du système de refroidissement. Cela, de sorte que la surface à l'extrémité de la colonne secondaire puisse entièrement être couverte. Le TIM doit être centré par rapport à la colonne d'injection (installée à l'étape suivante).
  - c. Insérer le module de la colonne secondaire dans les glissières. Fixer le module de sorte que l'extrémité inférieure de la colonne secondaire soit en contact avec le TIM.
  - d. Déposer un TIM sur l'extrémité supérieure de la colonne secondaire.
  - e. Déposer le récepteur sur le TIM, de sorte qu'il soit centré avec la colonne d'injection.
- Pour test « à vide » :** Ignorer cette étape.
- f. Déposer le second TIM sur le récepteur aligné avec la colonne d'injection.
- Pour test « à vide » :** Ignorer cette étape.
- g. Abaisser la colonne d'injection en dévissant les écrous papillons du bas (les autres écrous papillons sont destinés à l'alignement de l'injecteur). Conserver les mains sur les écrous pour toute la descente de l'injecteur.

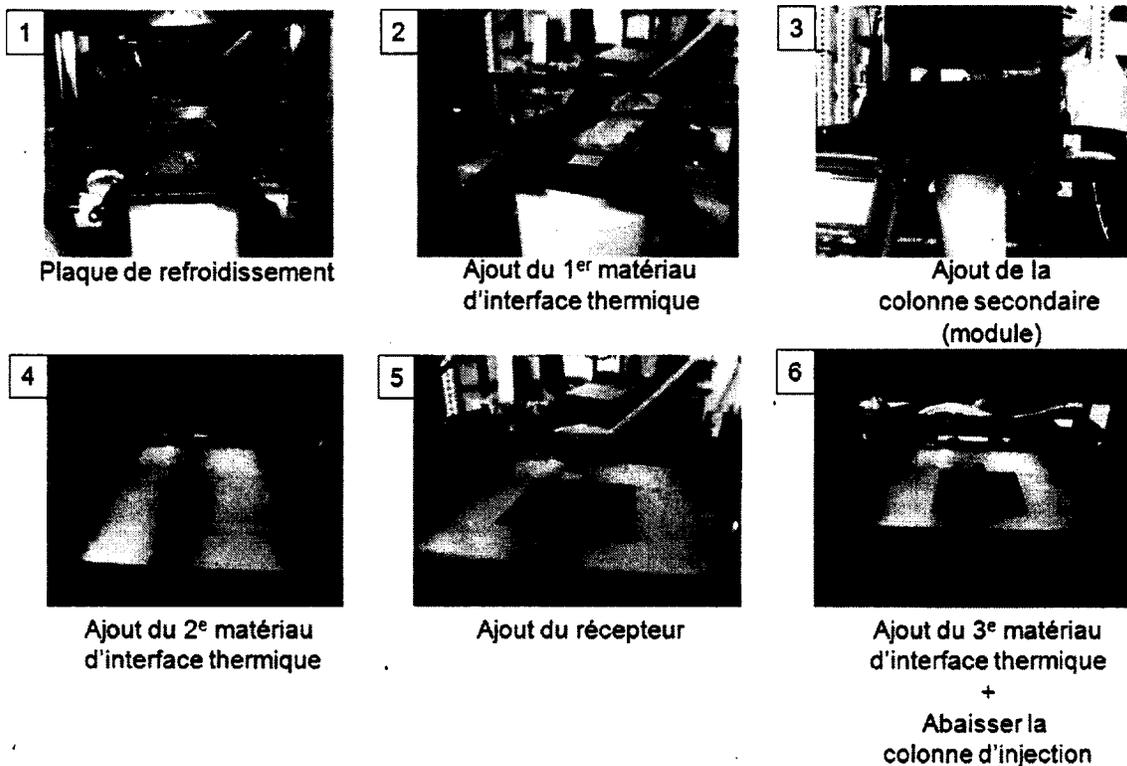


Figure I.16 Installation du récepteur pour caractérisation série

7. Ajouter la masse sur l'injecteur tel que présenté à la figure I.17.

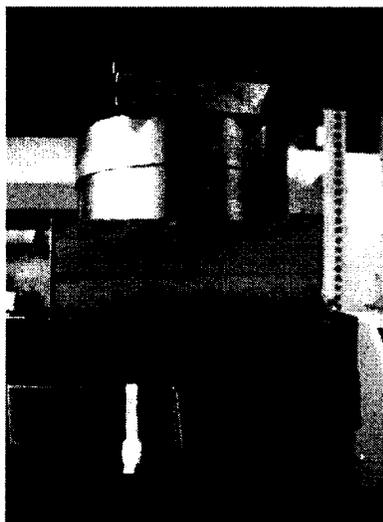


Figure I.17 Masse à ajouter sur l'injecteur

8. S'assurer en pesant sur l'injecteur et en le tournant que les contacts entre surfaces sont bien effectués.
9. Ouvrir la source de tension, tel que présenté à la figure I.18, pour produire environ de 25 W à 30 W. La lecture en puissance se fait à l'aide des ampèremètre et voltmètre.

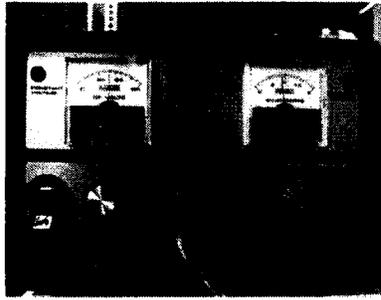


Figure I.18 Activation de la colonne d'injection

10. Attendre la fin de l'acquisition.
11. Vérifier que l'acquisition ne présente pas d'irrégularités. Répéter l'acquisition au besoin. (Il est toujours conseillé de répéter l'acquisition pour valider la stabilité du résultat)
12. Récupérer la résistance thermique, tel qu'identifié à la figure I.19, et les autres données pertinentes.

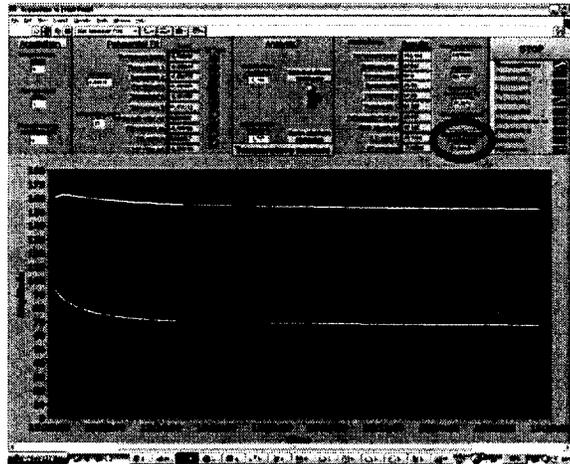


Figure I.19 Acquisition de la résistance thermique de l'échantillon

13. Fermer l'injecteur de chaleur.
14. Enlever les poids de sur l'injecteur.
15. Remonter la colonne par les écrous inférieurs de l'injecteur.
16. **Pour test « à vide »** : Transcrire la valeur de la case *Sample Thermal Resistance* dans la case *Series Platform Resistance*.

À ce point, si l'on désire poursuivre avec la caractérisation d'un autre récepteur, on exécute :

- Enlever le récepteur précédemment caractérisé
- Recommencer à l'étape 5.

Si l'on désire terminer la caractérisation d'échantillon, on exécute dans cet ordre :

- Fermer le refroidisseur
- Fermer le thermorégulateur

## ANNEXE J

### Documents relatifs au mémoire par article

## IEEE COPYRIGHT AND CONSENT FORM

To ensure uniformity of treatment among all contributors, other forms may not be substituted for this form, nor may any wording of the form be changed. This form is intended for original material submitted to the IEEE and must accompany any such material in order to be published by the IEEE. Please read the form carefully and keep a copy for your files.

TITLE OF PAPER/ARTICLE/REPORT, INCLUDING ALL CONTENT IN ANY FORM, FORMAT, OR MEDIA (hereinafter, "The Work"): **Thermal Resistance and Heat Spreading Characterization Platform for Concentrated Photovoltaic Cell Receivers**

COMPLETE LIST OF AUTHORS: **Collin, Louis-Michel; Arenas, Osvaldo; ArÃ©s, Richard; FrÃ©chette, Luc**

IEEE PUBLICATION TITLE (Journal, Magazine, Conference, Book): **Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**

### COPYRIGHT TRANSFER

1. The undersigned hereby assigns to The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated (the "IEEE") all rights under copyright that may exist in and to: (a) the above Work, including any revised or expanded derivative works submitted to the IEEE by the undersigned based on the Work; and (b) any associated written or multimedia components or other enhancements accompanying the Work.

### CONSENT AND RELEASE

2. In the event the undersigned makes a presentation based upon the Work at a conference hosted or sponsored in whole or in part by the IEEE, the undersigned, in consideration for his/her participation in the conference, hereby grants the IEEE the unlimited, worldwide, irrevocable permission to use, distribute, publish, license, exhibit, record, digitize, broadcast, reproduce and archive, in any format or medium, whether now known or hereafter developed: (a) his/her presentation and comments at the conference; (b) any written materials or multimedia files used in connection with his/her presentation; and (c) any recorded interviews of him/her (collectively, the "Presentation"). The permission granted includes the transcription and reproduction of the Presentation for inclusion in products sold or distributed by IEEE and live or recorded broadcast of the Presentation during or after the conference.

3. In connection with the permission granted in Section 2, the undersigned hereby grants IEEE the unlimited, worldwide, irrevocable right to use his/her name, picture, likeness, voice and biographical information as part of the advertisement, distribution and sale of products incorporating the Work or Presentation, and releases IEEE from any claim based on right of privacy or publicity.

4. The undersigned hereby warrants that the Work and Presentation (collectively, the "Materials") are original and that he/she is the author of the Materials. To the extent the Materials incorporate text passages, figures, data or other material from the works of others, the undersigned has obtained any necessary permissions. Where necessary, the undersigned has obtained all third party permissions and consents to grant the license above and has provided copies of such permissions and consents to IEEE.

Please check this box if you do not wish to have video/audio recordings made of your conference presentation.

See below for Retained Rights/Terms and Conditions, and Author Responsibilities.

### AUTHOR RESPONSIBILITIES

The IEEE distributes its technical publications throughout the world and wants to ensure that the material submitted to its publications is properly available to the readership of those publications. Authors must ensure that their Work meets the requirements as stated in section 8.2.1 of the IEEE

PSPB Operations Manual, including provisions covering originality, authorship, author responsibilities and author misconduct. More information on IEEE's publishing policies may be found at [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/pub\\_tools\\_policies.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/pub_tools_policies.html). Authors are advised especially of IEEE PSPB Operations Manual section 8.2.1.B12: "It is the responsibility of the authors, not the IEEE, to determine whether disclosure of their material requires the prior consent of other parties and, if so, to obtain it." Authors are also advised of IEEE PSPB Operations Manual section 8.1.1B: "Statements and opinions given in work published by the IEEE are the expression of the authors."

## **RETAINED RIGHTS/TERMS AND CONDITIONS**

### **General**

1. Authors/employers retain all proprietary rights in any process, procedure, or article of manufacture described in the Work.
2. Authors/employers may reproduce or authorize others to reproduce the Work, material extracted verbatim from the Work, or derivative works for the author's personal use or for company use, provided that the source and the IEEE copyright notice are indicated, the copies are not used in any way that implies IEEE endorsement of a product or service of any employer, and the copies themselves are not offered for sale.
3. In the case of a Work performed under a U.S. Government contract or grant, the IEEE recognizes that the U.S. Government has royalty-free permission to reproduce all or portions of the Work, and to authorize others to do so, for official U.S. Government purposes only, if the contract/grant so requires.
4. Although authors are permitted to re-use all or portions of the Work in other works, this does not include granting third-party requests for reprinting, republishing, or other types of re-use. The IEEE Intellectual Property Rights office must handle all such third-party requests.
5. Authors whose work was performed under a grant from a government funding agency are free to fulfill any deposit mandates from that funding agency.

### **Author Online Use**

6. **Personal Servers.** Authors and/or their employers shall have the right to post the accepted version of IEEE-copyrighted articles on their own personal servers or the servers of their institutions or employers without permission from IEEE, provided that the posted version includes a prominently displayed IEEE copyright notice and, when published, a full citation to the original IEEE publication, including a link to the article abstract in IEEE Xplore. Authors shall not post the final, published versions of their papers.
7. **Classroom or Internal Training Use.** An author is expressly permitted to post any portion of the accepted version of his/her own IEEE-copyrighted articles on the authors personal web site or the servers of the authors institution or company in connection with the authors teaching, training, or work responsibilities, provided that the appropriate copyright, credit, and reuse notices appear prominently with the posted material. Examples of permitted uses are lecture materials, course packs, e-reserves, conference presentations, or in-house training courses.
8. **Electronic Preprints.** Before submitting an article to an IEEE publication, authors frequently post their manuscripts to their own web site, their employers site, or to another server that invites constructive comment from colleagues. Upon submission of an article to IEEE, an author is required to transfer copyright in the article to IEEE, and the author must update any previously posted version of the article with a prominently displayed IEEE copyright notice. Upon publication of an article by the IEEE, the author must replace any previously posted electronic versions of the article with either (1) the full citation to the IEEE work with a Digital Object Identifier (DOI) or link to the article abstract in IEEE Xplore, or (2) the accepted version only (not the IEEE-published version), including the IEEE copyright notice and full citation, with a link to the final, published article in IEEE Xplore.

## **INFORMATION FOR AUTHORS**

### **IEEE Copyright Ownership**

It is the formal policy of the IEEE to own the copyrights to all copyrightable material in its technical publications and to the individual contributions contained therein, in order to protect the interests of the IEEE, its authors and their employers, and, at the same time, to facilitate the appropriate re-use of this material by others. The IEEE distributes its technical publications throughout the world and does so by various means such as hard copy, microfiche, microfilm, and electronic media. It also abstracts and may translate its publications, and articles contained therein, for inclusion in various compendiums, collective works, databases and similar publications.

### **Author/Employer Rights**

If you are employed and prepared the Work on a subject within the scope of your employment, the copyright in the Work belongs to your employer as a work-for-hire. In that case, the IEEE assumes that when you sign this Form, you are authorized to do so by your employer and that your employer has consented to the transfer of copyright, to the representation and warranty of publication rights, and to all other terms and conditions of this Form. If such authorization and consent has not been given to you, an authorized representative of your employer should sign this Form as the Author.

### **GENERAL TERMS**

1. The undersigned represents that he/she has the power and authority to make and execute this form.
2. The undersigned agrees to identify and hold harmless the IEEE from any damage or expense that may arise in the event of a breach of any of the warranties set forth above.
3. In the event the above work is not accepted and published by the IEEE or is withdrawn by the author(s) before acceptance by the IEEE, the foregoing grant of rights shall become null and void and all materials embodying the Work submitted to the IEEE will be destroyed.
4. For jointly authored Works, all joint authors should sign, or one of the authors should sign as authorized agent for the others.

**Louis-Michel Collin**

**Author/Authorized Agent For Joint Authors**

**29-05-2012**

**Date(dd-mm-yy)**

**THIS FORM MUST ACCOMPANY THE SUBMISSION OF THE AUTHOR'S MANUSCRIPT.**

Questions about the submission of the form or manuscript must be sent to the publication's editor. Please direct all questions about IEEE copyright policy to:

IEEE Intellectual Property Rights Office, [copyrights@ieee.org](mailto:copyrights@ieee.org), +1-732-562-3966 (telephone)

# LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] (1990). Properties of precious metals, properties and selection : Nonferrous alloys and special-purpose materials. *ASM Handbook, ASM International*, volume 2, p. 699–719.
- [2] (1990). Properties of wrought aluminum and aluminum alloys, properties and selection : Nonferrous alloys and special-purpose materials. *ASM Handbook, ASM International*, volume 2, p. 62–122.
- [3] Adams, J. (1990). Germanium and germanium compounds, properties and selection : Nonferrous alloys and special-purpose materials. *ASM Handbook, ASM International*, volume 2, p. 733–738.
- [4] Agostini, B., Fabbri, M., Park, J. E., Wojtan, L., Thome, J. R. et Michel, B. (2007). State of the art of high heat flux cooling technologies. *Heat Transfer Engineering*, volume 28, numéro 4, p. 258–281.
- [5] Akbarzadeh, A. et Wadowski, T. (1996). Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation. *Applied Thermal Engineering*, volume 16, numéro 1, p. 81–87.
- [6] Anderson, D. R. (1966). Thermal conductivity of polymers. *Chemical reviews*, volume 66, numéro 6, p. 677–690.
- [7] Araki, K., Uozumi, H. et Yamaguchi, M. (2002). A simple passive cooling structure and its heat analysis for 500 x concentrator PV module. Dans *29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, New Orleans, LA, USA, p. 1568–1571.
- [8] Arenas, O., Collin, L. M., Chow, S., Wheeldon, J. F., Valdivia, C. E., Hinzer, K., Frechette, L., Aimez, V. et Arès, R. (2010). Comparative thermal analysis of solar cells mounted on ceramic and metallic carriers and their optimization for CPV application. Dans *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, Honolulu, HI, USA, p. 2998–3002.
- [9] Cheknane, A., Benyoucef, B. et Chaker, A. (2006). Performance of concentrator solar cells with passive cooling. *Semiconductor Science and Technology*, volume 21, numéro 2, p. 144–7.
- [10] Chen, P.-C. et Lin, W.-K. (2001). The application of capillary pumped loop for cooling of electronic components. *Applied Thermal Engineering*, volume 21, numéro 17, p. 1739–54.
- [11] Cui, M., Chen, N., Yang, X., Wang, Y., Bai, Y. et Zhang, X. (2009). Thermal analysis and test for single concentrator solar cells. *Journal of Semiconductors*, volume 30, numéro 4.
- [12] Dalal, V. L. et Moore, A. R. (1977). Design considerations for highintensity solar cells. *Journal of Applied Physic*, volume 48, numéro 1244, p. 1244–1251.

- [13] Depoorter, G., Brog, T. et Readey, M. (1990). Structural ceramics, properties and selection : Nonferrous alloys and special-purpose materials. *ASM Handbook, ASM International*, volume 2, p. 1019–1024.
- [14] ElectroOpticalIndustries (2009). Electro optical industries. *Emissivity of Materials*. [http://www.electro-optical.com/eoi\\_page.asp?h=Emissivity%20of%20Materials](http://www.electro-optical.com/eoi_page.asp?h=Emissivity%20of%20Materials) (page consultée le 15 décembre 2012).
- [15] Ellison, G. N. (2003). Maximum thermal spreading resistance for rectangular sources and plates with nonunity aspect ratios. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 26 (2), volume 26, numéro 2, p. 439–454.
- [16] Feng, T. Q. et Xu, J. L. (2004). An analytical solution of thermal resistance of cubic heat spreaders for electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, volume 24, numéro 2-3, p. 323–337.
- [17] Guter, W., Schöne, J., Philipps, S. P., Steiner, M., Siefer, G., Wekkeli, A., Welsler, E., Oliva, E., Bett, A. W. et Dimroth, F. (2009). Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1 % conversion efficiency under concentrated sunlight. *Applied Physics Letters*, volume 94, numéro 22.
- [18] Harms, T. M., Kazmierczak, M. J. et Gerner, F. M. (1999). Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, volume 20, numéro 2, p. 149–157.
- [19] JEDEC Solid State Technology Association (May 2005). JESD51-12 - Guidelines for Reporting and Using Electronic Package Thermal Information. *JEDEC Standard*.
- [20] Kang, S.-W., Tsai, M.-C., Weng, M.-T. et Hsu, C.-H. (2009). Development of thermal spreading technology nowadays. Dans *2009 4th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, Dept. of Mech. Electro-Mech. Eng., Tamkang Univ., Tamsui, Taiwan. IEEE, Piscataway, NJ, USA, p. 328–35.
- [21] Kempers, R., Kolodner, P., Lyon, A. et Robinson, A. J. (May 2008). Development of a high-accuracy thermal interface material tester. Dans *11th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems ITherm*. IEEE, Orlando, FL, USA, p. 211–226.
- [22] Kinsey, G. S. et Edmonson, K. M. (2009). Spectral response and energy output of concentrator multijunction solar cells. *Progress in Photovoltaics : Research and Application*, volume 17, numéro 5, p. 279–288.
- [23] Min, C., Nuofu, C., Jinliang, W., Lei, L., Peng, W., Yanshuo, W. et Yiming, B. (2008). Thermal test and analysis of concentrator solar cells. Dans *Proceeding of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. volume 6841. SPIE, Beijing, China.
- [24] Minao, J., Gonxzalez, J. et Zanesco, I. (1994). Flat high concentration devices. Dans *Proceedings of 1994 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WC-PEC)*, vol. 1. IEEE, Hawaii, USA.

- [25] Ndao, S., Peles, Y. et Jensen, M. K. (2009). Multi-objective thermal design optimization and comparative analysis of electronics cooling technologies. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, volume 52, numéro 19-20, p. 4317–4326.
- [26] NREL (November 2011). 2010 Solar Technologies Market Report. *U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy*.
- [27] Robinson, P. (1990). Properties of precious metals, properties and selection : Non-ferrous alloys and special-purpose materials. *ASM Handbook, ASM International*, volume 2, p. 62–122.
- [28] Robinson, P. (1990). Properties of wrought coppers and copper alloys, properties and selection : Nonferrous alloys and special-purpose materials. *ASM Handbooks*, volume 2, p. 265–345.
- [29] Royne, A. et Dey, C. J. (2007). Design of a jet impingement cooling device for densely packed pv cells under high concentration. *Solar Energy*, volume 81, numéro 8, p. 1014–1024.
- [30] Royne, A., Dey, C. J. et Mills, D. R. (2005). Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination : A critical review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, volume 86, numéro 4, p. 451–483.
- [31] Sikka, K. K. (March 2005). An analytical temperature prediction method for a chip power map. Dans *21st Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. IEEE, San Jose, CA, p. 161–167.
- [32] Solfocus (2009). Solfocus cpv system. *SolFocus Technology Highlights*. <http://www.solfocus.com/en/technology/> (page consultée le 15 janvier 2012).
- [33] Stern, M., Kearns, D., Gektin, V. et Jhoty, G. (2006). A methodology for thermal evaluation of strongly bonded packaging materials. Dans *2006 Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems -Proceedings of the Intersociety Conference IThERM*. IEEE, San Jose, CA, USA, p. 505–511.
- [34] Thomas, L. C. (1999). *Heat Transfer Professionnal Version*. Second Ed. Capstone Publishing Corp., Tulsa, Oklahoma, 1024 p.
- [35] Tuckerman, D. B. et Pease, R. F. W. (1981). High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters*, volume 2, numéro 5, p. 126–129.
- [36] Tzen, J.-W., Weber, T. et Krassowski, D. (2000). Technical review on thermal conductivity measurement techniques for thin thermal interfaces. Dans *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2000. Sixteenth Annual IEEE*. p. 174–181.
- [37] van Kessel, T. G., Martin, Y. C., Sandstrom, R. L. et Guha, S. (2008). Extending photovoltaic operation beyond 2000 suns using a liquid metal thermal interface with passive cooling. Dans *Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE*. IEEE, p. 1–3.

- [38] WakefieldEngineering (2010). Wakefield solutions. *Wakefield Solutions Thermal Accessories 120 Series*. <http://www.wakefield.com/Catalog/tabid/92/CategoryID/104/ProductID/317/Default.aspx?showSeries=104&order=0> (page consultée le 16 décembre 2011).
- [39] Washko, S. et Aggen, G. (1990). Wrought stainless steels, properties and selection : Irons, steels, and high-performance alloys. *ASM Handbook, ASM International*, volume 1, p. 841-907.
- [40] Xuan, Y., Hong, Y. et Li, Q. (2004). Investigation on transient behaviors of flat plate heat pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, volume 28, numéro 2-3, p. 249-255.
- [41] Ye, Z., Li, Q., Zhu, Q. et Pan, W. (2009). The cooling technology of solar cells under concentrated system. Dans *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 09)*. IEEE, Wuhan, China.