



Université du Québec en Outaouais

Département d'informatique et d'ingénierie
Doctorat en sciences et technologies de l'information - 3081

CARACTÉRISATIONS THERMIQUES PAR THERMOGRAPHIE
IR ET MÉTHODE DE STABILISATION THERMIQUE
CELLULAIRE PAR IMPACT DE JETS D'AIR POUR LES
DÉTECTEURS DE TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE
POSITRONS À BASE DE PHOTODIODES À AVALANCHE

THERMAL CHARACTERIZATIONS BY IR
THERMOGRAPHY AND THERMAL STABILIZATION
METHOD BY CELLULAR AIR IMPINGENT FOR
DETECTORS OF AVALANCHE-PHOTODIODE POSITRON
EMISSION TOMOGRAPHY

By / par

Michel Saydé

Thesis / thèse

Présentée au Département d'informatique et d'ingénierie pour l'obtention du grade de
Doctorat en philosophie (Ph. D.) en sciences et technologies de l'information

Mars 2020

JURY D'ÉVALUATION

Président du jury : Prof. Ilham Benyahia (UQO)

Examineur externe : Prof. Adam Skorek (UQTR)

Examineur interne : Prof. Michael Korwin-Pawlowski (UQO)

Directeur de thèse : Prof. Ahmed Lakhssassi (UQO)

Co-directeur de thèse : Prof. Emmanuel Kengne (UQO)

TABLE DES MATIÈRES

JURY D'ÉVALUATION	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XIV
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	XV
NOMENCLATURE	XVII
ABSTRACT	XIX
RÉSUMÉ	XXI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1-1
1.1 LE PROJET LABPET II	1-2
1.2 PRINCIPE DE L'IMAGERIE NUCLÉAIRE PAR TEP-PDA	1-3
1.3 IDENTIFICATION DU PROBLÈME THERMIQUE	1-7
1.3.1 PROBLÈME DE LA STABILITÉ THERMIQUE DANS LES TEP-PDA	1-7
1.3.2 COMPLEXITÉ DE LA STRUCTURE DU SCANNEUR LABPET II	1-7
1.3.3 LE DÉFI THERMIQUE DANS LABPET II	1-9
1.3.4 MON MONDÂT AU SEIN DU PROJET LABPET II	1-12
1.4 LES MOTIVATIONS	1-12
1.5 LES OBJECTIFS	1-13
1.6 CONTRIBUTIONS ET ORIGINALITÉ DE LA THÈSE	1-15

1.7	JUSTIFICATION DE LA RECHERCHE	1-16
1.8	ORGANISATION DE LA THÈSE	1-18
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE ET ÉTAT DE L'ART		1-20
2.1	LA RÉSISTANCE OHMIQUE ET LA PUISSANCE DISSIPÉE DANS LES CIRCUITS ÉLECTRIQUES	2-21
2.2	SOURCE DE LA PUISSANCE DISSIPÉE DANS LES CIRCUITS INTÉGRÉS CMOS.	2-22
2.3	LA GESTION THERMIQUE DANS LES CI	2-23
2.3.1	PRINCIPES DE TRANSFERT DE CHALEUR DANS LE CONTEXTE DES CI	2-23
2.3.1.1	La conduction	2-23
2.3.1.2	La convection	2-24
2.3.1.3	La radiation	2-25
2.4	LE CALCUL THERMIQUE DANS L'ÉLECTRONIQUE ET LES CI	2-25
2.5	MODÈLE THERMIQUE D'UN CIRCUIT INTÉGRÉ	2-27
2.5.1	LA DISSIPATION THERMIQUE MAXIMALE DANS LES CI ET LE FACTEUR DE RÉDUCTION (POWER DERATING)	2-29
2.6	LE TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION FORCÉE	2-30
2.6.1	LES PRINCIPAUX NOMBRES CARACTÉRISTIQUES DE LA CONVECTION ET LEURS SIGNIFICATIONS	2-32
2.6.1.1	Le nombre Reynold :	2-32
2.6.1.2	Les diamètres hydrauliques :	2-33
2.6.1.3	Le nombre Reynold et l'écoulement externe :	2-34
2.6.1.4	Le nombre Reynold et l'écoulement interne :	2-35
2.6.1.5	Le nombre Prandtl :	2-37
2.6.1.6	Le nombre Nusselt :	2-38
2.7	LA CONVECTION FORCÉE PAR JET D'IMPACT	2-40
2.7.1	LE PARAMÈTRE H/D DANS LE JET D'IMPACT	2-42
2.8	LE CONTRÔLE THERMIQUE NUMÉRIQUE	2-42
2.9	LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE	2-45
2.10	LES NIVEAUX HIÉRARCHIQUES DE GESTION THERMIQUE DANS L'ÉLECTRONIQUE.	2-46

2.11	PROBLÈMES ET LIMITATIONS DU SEMICONDUCTEUR, ET LES TECHNOLOGIES ALTERNATIVES (NIVEAU ZÉRO)	2-48
2.11.1	LES SUPER-CONDUCTEURS, POUR UNE RÉSISTANCE OHMIQUE DE ZÉRO !	2-51
2.11.2	LA PHOTONIQUE ET L'OPTOÉLECTRONIQUE POUR UN MEILLEUR RENDEMENT THERMIQUE	2-52
2.12	TECHNIQUE POUR CONDUIRE LA CHALEUR VERS L'EXTÉRIEUR DU CI (NIVEAU 2)	2-54
2.12.1	CONSIDÉRATIONS THERMIQUES DANS LES QFN ET LES AUTRES EPP PACKAGES	2-54
2.12.2	CONSIDÉRATIONS THERMIQUES DANS LES « WAFER LEVEL CHIP SCALE PACKAGE » (WLCSP)	2-56
2.13	ÉTAT DE L'ART SUR QUELQUES TECHNIQUES DE REFROIDISSEMENT DANS L'ÉLECTRONIQUE MODERNE (NIVEAU 3)	2-58
2.13.1	GESTION THERMIQUE PASSIVE	2-58
2.13.1.1	Matériau à changement de phase	2-60
2.13.1.2	Le Caloduc (Heat Pipe)	2-62
2.13.1.3	Les "Metal Micro-Textured Thermal Interface Materials" (TIM)	2-65
2.13.1.4	Autre interface médiane thermique	2-66
2.13.2	GESTION THERMIQUE ACTIVE	2-67
2.13.2.1	Refroidisseurs à plaques froides (une seule phase)	2-68
2.13.2.2	Nanofluide pour meilleur échange thermique	2-69
2.13.2.3	Refroidissement à deux phases pompées	2-70
2.13.2.4	Refroidissement par la méthode d'impact de jets d'air	2-70
2.13.2.4.1	L'impact d'air multijets sur une surface plane	2-70
2.13.2.4.2	Solution de refroidissement par impact direct à jets multiples basés sur des polymères à haute efficacité pour les composants à haute puissance	2-72
2.13.2.4.3	Intégration du refroidissement par impact de jet avec des substrats de cuivre liés directement pour la gestion thermique de l'électronique de puissance	2-73
2.13.2.4.4	Refroidissement par jet d'impact unique et direct d'un module électronique de MOSFET de puissance	2-74
2.13.2.4.5	Étude numérique du transport thermique dans les impacts de jets simples et multiples confinés à travers des canaux à section transversale non uniforme remplis de matériaux poreux	2-76

2.14	REFROIDISSEMENT ET STABILISATION THERMIQUE DANS LES TEP-PDA	2-77
2.15	MÉTHODES DE CARACTÉRISATION THERMIQUE DANS L'ÉLECTRONIQUE	2-78
CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION THERMIQUE DE LA DB		2-80
3.1	INTRODUCTION	3-81
3.1.1	LE MODÈLE THERMIQUE DE LA DB	3-81
3.1.2	DÉFIS ET MOTIVATION	3-83
3.2	MATÉRIELS ET MATÉRIAUX	3-84
3.3	MESURE ET QUANTIFICATION DE LA PUISSANCE ÉQUIVALENTE P_E	3-88
3.3.1	MÉTHODE	3-88
3.3.2	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	3-89
3.4	MESURE DE TEMPÉRATURES ET DE PUISSANCES ÉQUIVALENTES SUR CHAQUE ASIC	3-90
3.4.1	MÉTHODES	3-91
3.4.2	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	3-92
3.5	LES RÉISTANCES THERMIQUES CARACTÉRISTIQUES SPATIALES DE LA DB EN DIRECTION DE L'AXE DES X	3-93
3.5.1	MÉTHODES	3-94
3.5.2	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	3-95
3.6	LES RÉISTANCES DE CARACTÉRISATION THERMIQUE $\Psi_{B1, B2}$ ET LE RÉGLAGE DE L'ÉMISSIVITÉ DE LA PEINTURE THERMIQUE	3-101
3.6.1	MÉTHODE	3-104
3.6.2	RÉSULTATS	3-106
3.6.3	DISCUSSION	3-112
3.7	DISSIPATION DE PUISSANCE THERMIQUE À PARTIR DE LA DB-FACE 1 AVEC CONVECTION FORCÉE	3-113
3.7.1	MÉTHODES	3-114
3.7.1.1	Dissipation de puissance thermique à partir des ASIC-Top	3-114
3.7.1.2	Dissipation de puissance thermique de la DB-face 1 sans HS	3-117

3.7.1.3	Dissipation de l'énergie thermique par DB-face 1 et par les HS sur les ASICs-top	3-117
3.7.2	RÉSULTATS ET DISCUSSION	3-118
3.8	CONCLUSION	3-120
CHAPITRE 4 CONCEPTION ET OPTIMISATION DES PARAMÈTRES ET DES RÉSULTATS DE LA CAI		3-121
<hr/>		
4.1	INTRODUCTION	4-122
4.1.1	PRINCIPE DE LA CAI	4-125
4.2	MÉTHODES MATÉRIELLES ET MATÉRIAUX	4-126
4.2.1	MATÉRIELS ET MATÉRIAUX	4-126
4.2.2	MÉTHODE DE MESURE DE L'ÉCOULEMENT DE L'AIR À LA SORTIE D'UNE BUSE OU D'UN ORIFICE	4-131
4.3	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	4-132
4.3.1	MESURE DE L'EFFET DE VARIATION DE TEMPÉRATURE T_C SUR T_{B2}	4-132
4.3.1.1	Discussion	4-133
4.3.2	MESURE DE L'EFFET DE VARIATION DE LA VITESSE DE L'AIR CONVectif	4-134
4.3.3	PROBLÈMES ET DIFFICULTÉS DANS LES PRISES DE MESURES	4-137
4.3.4	MESURE DE LA STABILITÉ THERMIQUE DE LA TEMPÉRATURE T_{B2}	4-139
4.3.5	ANALYSE ET DISCUSSION	4-141
4.3.6	SYSTÈME DE COMPENSATION THERMIQUE	4-142
4.4	CONCEPTION ET SPÉCIFICATIONS DE LA CAI	4-143
4.4.1	MESURE DE NIVEAU DE BRUIT SONORE	4-146
4.4.2	CONFIGURATION FINALE DE LA CAI	4-146
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS		4-148
<hr/>		
5.1	CONCLUSION	5-149
5.2	TRAVAUX FUTURS	5-150
ANNEXE		152
<hr/>		

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1. L'EMISSION D'UN POSITRON ET L'ANNIHILATION ELECTRON-POSITRON RESULTENT EN UN ECLATEMENT DE DEUX FAISCEAUX GAMMA DE 511 KEV CHACUN. CES FAISCEAUX VOYAGENT DANS DES DIRECTIONS OPPOSEES (180°) A UNE VITESSE EGALE A 3 M / NS.....	1-4
FIGURE 1.2. A) UNE VERITABLE ANNIHILATION DE COÏNCIDENCE ; B) ANNIHILATION AFFECTEE PAR LA DIFFUSION DE COMPTON ; C) MONTRE L'EFFET FORTUIT.....	1-5
FIGURE 1.3. ÉLÉMENTS ET REPRESENTATION DU SCANNEUR LABPET II.	1-9
FIGURE 1.4. IMAGE D'UNE DB. A) MONTRE LA SURFACE 1 DE LA DB ET CES DEUX ASICs. B) MONTRE LA SURFACE 2 ET LES 4 CRISTAUX DE SCINTILLATEUR (LES PDA ET LE SUBSTRAT EN CERAMIQUE SONT CACHES PAR LES CRISTAUX.	1-10
FIGURE 1.5. REPONSE CARACTERISTIQUE DE LA SORTIE D'UN PDA (COUPLE A UN CRISTAL SCINTILLATEUR) EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR UN NIVEAU DE DETECTION DONNE CONSTANT COMME REFERENCE.....	1-12
FIGURE 2.1. CIRCUIT INTERNE D'UN MOSFET A CANAL N ⁺	2-22
FIGURE 2.2. LE MODELE THERMIQUE TYPIQUE D'UN CI (AN862) [40]	2-28
FIGURE 2.3 DISSIPATION DE PUISSANCE VS TEMPERATURE DU BOITIER [43]	2-30
FIGURE 2.4. ÉCOULEMENT INTERNE A) LAMINAIRE, B) TURBULENT	2-33
FIGURE 2.5. LES DIAMETRES HYDRAULIQUES DE QUELQUES FORMES POPULAIRES [48].	2-34
FIGURE 2.6. ÉVOLUTION DE L'ÉCOULEMENT DE FLUIDE SUR UNE SURFACE PLANE (x) POUR UN ÉCOULEMENT EXTERNE [48].	2-35
FIGURE 2.7. DEVELOPPEMENT DES PROFILS DE VITESSE ET DES CHANGEMENTS DE PRESSION D'UN ÉCOULEMENT A L'ENTREE D'UN CONDUIT [49, CH. 6].....	2-36
FIGURE 2.8. DEVELOPPEMENT DE LA COUCHE LIMITE THERMIQUE SUR UNE SURFACE PLANE ISOTHERMIQUE [50, CH.6].	2-39
FIGURE 2.9. A) CONVECTION SUBMERGEE A JET D'IMPACT POUR REFROIDIR LES IC, B) ET C) MONTRE LES REGIONS ET CONDITIONS DE CETTE CONVECTION. [52, p432], c) [53]	2-41

FIGURE 2.10. BLOC-DIAGRAMME D'UN SYSTEME CONTROLE NUMERIQUEMENT AVEC UNE BOUCLE DE COMPENSATION DE RETOUR.	2-44
FIGURE 2.11. HIERARCHIE SCHEMATIQUE DU TRANSFERT DE CHALEUR A L'ECHELLE MICROSCOPIQUE DANS UN BOITIER ELECTRONIQUE [76].	2-47
FIGURE 2.12. PREMIER TRANSISTOR FONCTIONNEL D'UNE GRILLE DE 1 NM [79].	2-50
FIGURE 2.13. DISPOSITIF SUPER-CONDUCTEUR-SEMICONDUCTEUR COUPLET DANS UN MAJORANA NANO-WIRE [88]. 2-52	
FIGURE 2.14. AYAR LABS SUPERNOVA, EST UN PIC POUR ALIMENTATION EN LUMIERE. IL GENERE HUIT OU SEIZE LONGUEURS D'ONDE DE LUMIERE EN BANDE O, AVEC CAPABILITE DE MULTIPLEXAGE, DISTRIBUTION ET AMPLIFICATION POUR UN TOTAL DE 256 CANAUX DE DONNEES, SOIT 6,4 Tb/s [93].	2-53
FIGURE 2.15. EXEMPLE DE BOITIER DE TYPE 'QUAD FLAT NO LEAD' DE TI [94]	2-55
FIGURE 2.16. A) TRANSFERT DE CHALEUR DANS LES EPP, B) VUE LATERALE DU PCB, EP, DES BIAIS THERMIQUES ET DE 'THERMAL LANDING' [40].	2-56
FIGURE 2.17. UN MICRO WLCSP TYPIQUE DE 3x3 [96].	2-57
FIGURE 2.18. GESTION THERMIQUE PASSIVE, TRANSFERT DE LA CHALEUR ENTRE SOLIDES ET FLUIDE PAR CONVENTION NATURELLE [103].	2-59
FIGURE 2.19. HAUSSE DE LA TEMPÉRATURE EN FONCTION DE L'ACCUMULATION D'ÉNERGIE DANS LE TEMPS. LA TEMPÉRATURE EST MAINTENUE PENDANT LA TRANSITION DE PHASE.	2-60
FIGURE 2.20. UN RADIATEUR A MPC (GRACE A 'ADVANCED COOLING TECHNOLOGIES').	2-61
FIGURE 2.21. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU HP [105, 106]	2-63
FIGURE 2.22. A) LE CONCEPT DE MMT-TIM (METAL MICRO-TEXTURED THERMAL INTERFACE MATERIALS); B) RESULTATS DE COMPARAISONS DE TRANSFERT DE LA CHALEUR ENTRE LE PAD EN GRAPHITE ET LE MMT-TIM. [108] 2-66	
FIGURE 2.23. A) ÉPOXY ADHÉSIF THERMIQUE; B) RUBAN ADHÉSIF THERMIQUE.	2-67
FIGURE 2.24. EXEMPLE D'UN SYSTEME DE REFROIDISSEMENT ACTIF [103].	2-68
FIGURE 2.25. SYSTEME DE STABILISATION THERMIQUE 'COOL PLATE COOLING CHILLERS' DE BV THERMAL SYSTEMS [110]. 2-69	
FIGURE 2.26. CONFIGURATION DE LA SIMULATION DU MODELE THERMIQUE [47].	2-71

FIGURE 2.27. REPARTITION DE LA TEMPERATURE SUR LA SECTION TRANSVERSALE MOYENNE DU DISSIPATEUR THERMIQUE AVEC LES RAPPORTS Z/D DE 6, 8 ET 10 ET Re DE 7000 A 11000 [47].	2-72
FIGURE 2.28. CONCEPT DU REFROIDISSEUR DE POLYMER EN FORME DE 3D: A) SECTION TRANSVERSALE DE LA STRUCTURE INTERNE DU REFROIDISSEUR A JETS MULTIPLES; B) VUE DE COTE DES ENTREES ET SORTIES REPARTIES DANS LA PLAQUE A BUSES [115].	2-73
FIGURE 2.29. A) MONTRE LA COUPE TRANSVERSALE DE LA STRUCTURE, B) LES RESULTATS EXPERIMENTAUX.	2-74
FIGURE 2.30. SCHEMA DU CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT, DE LA MESURE ET DE LA CONFIGURATION ELECTRIQUE [117].	2-75
FIGURE 2.31. UN RADIATEUR A MATERIAUX POREUX INSTALLE SUR UN DISPOSITIF DE PUISSANCE POUR DISSIPER LA CHALEUR DE CE DERNIER [119].	2-76
FIGURE 2.32. REFROIDISSEMENT D'EAU A BOUCLE FERMEE D'UN TEP-PDA [120].	2-77
FIGURE 3.1. LE MODELE THERMIQUE DE LA DB. A) ET C) REPRESENTATION VISUELLE DU PLAN CARTESIEN ET DU PLACEMENT PHYSIQUE DES ELEMENTS THERMIQUES DU MODELE. B) LE CIRCUIT DU MODELE THERMIQUE.	3-82
FIGURE 3.2. LTM AVEC TROIS DBS INSTALLEES.	3-87
FIGURE 3.3. A) DEUX MOSFETS ATTACHES A LA DBN-FACE 1 ET LA SURFACE EST PEINTE AVEC LA PEINTURE THERMIQUE ; B) LA DBN FACE 2 EST PEINTE AVEC LA PEINTURE THERMIQUE	3-88
FIGURE 3.4. COURBE DE TEMPERATURE DE LA JONCTION DU MOSFET EN FONCTION DE LA VARIATION DE PUISSANCES EQUIVALENTES.	3-90
FIGURE 3.5. A) L'IMAGE THERMIQUE DE LA DB-FACE 1 AVEC UN MOSFET DE $P_D = 550\text{mW}$ (QUI EST EQUIVALENTE A LA PUISSANCE D'UN ASIC DE LA DB) ; B) LA MEME DB-FACE 2.	3-93
FIGURE 3.6. A) IMAGE THERMIQUE DE LA DB-FACE 2 AVEC UN SEUL MOSFET ALIMENTE DE $P_D = 1\text{ W}$; B) GRADIENT DE TEMPERATURE SUR LA DB-FACE 2 ; C) LES RESISTANCES THERMIQUES CARACTERISTIQUES SPATIALES $\Psi_{B2}(x, y)$.	3-96
FIGURE 3.7. A) IMAGE THERMIQUE DE LA DB-FACE 2 AVEC DEUX MOSFETS ALIMENTES AVEC UNE $P_D = 550\text{ mW}$ CHACUN ; B) GRADIENT DE TEMPERATURE SUR LA DB-FACE 2 ; C) LA RESISTANCE THERMIQUE CARACTERISTIQUE SPATIALE $\Psi_{B2}(x, y)$ SUR LA DB-FACE-2.	3-98
FIGURE 3.8. A) IMAGE THERMIQUE DE LA DB-FACE 1 ; B) IMAGE THERMIQUE DE LA DB-FACE 2 ; C) GRADIENT DE TEMPERATURE SUR LA DB-FACE 2 ; C) LA RESISTANCE THERMIQUE CARACTERISTIQUE SPATIALE $\Psi_{B2}(x, y)$ SUR LA DB-FACE-2.	3-100
FIGURE 3.9. CONFIGURATION DE MESURE DU FOUR DE LA DBN.	3-105

FIGURE 3.10.	MISE EN PLACE DE L'EXPERIENCE ; A) SUR LA FACE DB 1, ON PEUT VOIR LE THERMOCOUPLE FIXE ENTRE L'ASIC ET LE CONNECTEUR ; B) LE PCB AU-DESSUS DU FOUR ET PRETE POUR L'EXPERIENCE, ON PEUT VOIR LE FIL DU THERMOCOUPLE SORTIR DU COTE GAUCHE DU DESSUS DU FOUR.....	3-106
FIGURE 3.11.	A) L'IMAGE IR DE LA DBN-FACE 2 (APRES L'AJUSTEMENT DE E); B) HISTOGRAMME DE LA ZONE AUTOUR DE L'EMPLACEMENT DU THERMOCOUPLE ; C) HISTOGRAMME DE LA ZONE EXCLUANT LE CONNECTEUR ET LES BORDS EXTERNES DE LA CARTE.....	3-107
FIGURE 3.12.	A) PHOTO DE LA ZONE VISEE SUR LA DBN-FACE 2 ; B), LA CARTOGRAPHIE $\Psi_{B1, B2}(x, y)$ DE LA DBN-FACE 2, LES RESISTANCES CARACTERISTIQUES THERMIQUES SE SITUENT ENTRE 2,5 ET 3,5 °C/W (L'EFFET DU THERMOCOUPLE SUR LA SURFACE N'A PAS ETE PRIS EN COMPTE DANS L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE THERMIQUE).	3-109
FIGURE 3.13.	LA PHOTO IR BRUTE DE LA DB-FACE 2 DANS LE FOUR OBTENU PAR LA CAMERA IR.....	3-110
FIGURE 3.14.	LES RESULTATS DE L'EXPERIENCE SUR LA DB-FACE 2 ; A) GRADIENT DE TEMPERATURE ; B) HISTOGRAMME DE LA FREQUENCE DE TEMPERATURES ; C) $\Psi_{B1, B2}(x, y)$ (N'INCLUT PAS DE LA ZONE SOUS LE CONNECTEUR). ..	3-111
FIGURE 3.15.	CONTRIBUTION D'AUTRES SOURCES DE CHALEUR SUR L'AB A L'AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE CHALEUR DE DB.	3-113
FIGURE 3.16.	A) LE MASQUE DE HS TYPE 1, ON VOIT LE PONTAGE AU-DESSUS DES COMPOSANTS AUTOUR DES ASICS ; B) VUE LATERALE ET DESSUS DU HS SUR LES DEUX ASICS; C) MISE EN PLACE DE L'EXPERIENCE, ON VOIT L'ORIFICE AU-DESSUS DU HS ET LE CABLE DU THERMOCOUPLE.....	3-116
FIGURE 3.17.	A) VUE DE COTE DES DEUX PETITS HS SUR CHACUN DES ASICS; B) VUE DE DESSUS.	3-118
FIGURE 3.18.	IMAGE THERMIQUE A L'ETAT D'EQUILIBRE DE LA DB ALIMENTEE PAR LE LTM; A) IMAGE THERMIQUE DE LA DB-FACE 2; B) IMAGE THERMIQUE SUR LA FACE 1.	3-119
FIGURE 4.1.	LE BLOC DIAGRAMME DE LA CAI.....	4-124
FIGURE 4.2.	A) BLOCK DIAGRAMME DE LA CAI; B) LE JET D'AIR FROID FRAPPE LA SURFACE 1 DE LA DB ET IL SERA RECUPERE DES DEUX COTES (COMME LE MONTRE L'ILLUSTRATION).	4-126
FIGURE 4.3.	A) DEUX BUSES B) DEUX ORIFICES.....	4-128
FIGURE 4.4.	A) HUIT CELLULES DE L'ORIFICE 1 ; B) UNE CELLULE DE LA BUSE 2.....	4-129
FIGURE 4.5.	LE MONTAGE POUR MESURER L'ECOULEMENT A LA SORTIE D'UNE BUSE (OU ORIFICE).....	4-132
FIGURE 4.6.	VARIATION DE T_{B2} SUR FACE 2 DE LA DB EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR CONVECTIF (T_C). ...	4-133

- FIGURE 4.7. SERIES DE MESURES DE T_{B2} EN FONCTION DE LA VITESSE DE T_c POUR : A) LA B1, AVEC UN ECOULEMENT DE 1,25 A 8,8 SLPM; B) LA B2, AVEC UN ECOULEMENT DE 1,4 A 10 SLPM; C) L'O1, AVEC UN ECOULEMENT DE 1,4 A 9,8 SLPM; ET D) L'O2 AVEC UN ECOULEMENT DE 1,5 A 1,2 SLPM. 4-136
- FIGURE 4.8. A) EFFET DE SOURCES DE CHALEUR DE L'AB, SUR LA DB-FACE 2; B) LA REDUCTION DE ΔT ENTRE LES DEUX CARTES APRES QU'ON A AUGMENTE Z. 4-139
- FIGURE 4.9 L'ORIFICE 2 ET L'AJOUT D'UN ELEMENT DE COMPENSATION THERMIQUE SUR LE COU DE L'ORIFICE. LA PHOTO DE DROITE MONTRE LA CAVITE QUI CONTIENT L'ELEMENT..... 4-143
- FIGURE 4.10 LA REPOSE DE LA PRESSION STATIQUE EN FONCTION DE L'ECOULEMENT DE LA SOUFFLEUSE DE TYPE 9BMB12P2K01, LE TRAÇAGE EN ROUGE MONTRE LE FONCTIONNEMENT A 30% AVEC $P_S = 38$ PA, POUR UN $E = 627$ SLPM ($E_{TOT} = 1253$ SLPM POUR DEUX SOUFFLEUSES) 4-145
- FIGURE 4.11 LA CONFIGURATION FINALE DE LA CAI SUR LE SCANNEUR LABPET II..... 4-147

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1	ÉQUIVALENTS THERMIQUES DES GRANDEURS ELECTRIQUES.....	2-26
TABLEAU 2.2	VALEURS TYPQUES DU TRANSFERT DE CHALEUR CONVECTIVE DE QUELQUES FLUIDES [45].	2-31
TABLEAU 2.3	LISTE DE LA VISCOSITE CINEMATIQUE ET PR DE QUELQUES FLUIDES [45].	2-37
TABLEAU 2.4	LES TYPES DE MCP INCLUENT LES CIRES DE PARAFFINE, LES PRODUITS ORGANIQUES NON PARAFFINES, LES SELS HYDRATES ET LES PRODUITS METALLIQUES [39].	2-62
TABLEAU 2.5	LISTE DE QUELQUES HP, LEURS OBJECTIVES UTILISATIONS ET CONDUCTIVITES	2-64
TABLEAU 2.6	COMPARAISON DE PLUSIEURS MODELES DE TURBULENCE CFD UTILISES POUR RESOUDRE DES PROBLEMES DE JET D'IMPACT [47].	2-71
TABLEAU 3.1	LECTURES DE THERMOCOUPLES.....	3-108
TABLE 3.2	LECTURE DE THERMOCOUPLES.	3-109
TABLEAU 3.3	TABLEAU COMPARATIF DES TROIS METHODES.	3-120
TABLEAU 4.1	LE FACTEUR DE MULTIPLICATION DE CONVECTION RELATIVE A L'ALTITUDE [129]	4-124
TABLEAU 4.2	COMPARAISON DE LA STABILITE THERMIQUE AVEC ET SANS RADIATEURS.	4-141
TABLEAU 4.3	COMPARAISON DE LA STABILITE THERMIQUE AVEC ET SANS RADIATEURS AVEC L'AUGMENTATION DE P_D .	4-141

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

amb	ambiante
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CBC	Clamped Boundary Condition
CDV	champ de vision
CFD	Computational fluid dynamics
CI	Circuit intégré
CAI	Cellulaire par impact de jets d'air (Cellular Air Impingement)
CIR	caméra infrarouge
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
conv	Convectif
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
DB	Detector board
DSP	Digital Signal Processor
EPP	Exposed- Paddle Packages
FPGA	Field Programmable Gate Array
GUI	Graphic User Interface
Hz	Hertz
IR	Infra rouge (Infra Red)
ISE	Integrated Simulation Environment
JTAG	Joint Test Action Group
LAIC	Large Area Integrated Circuit

LED	Light Emitting Diode
LFM	Linear Feet per Minute
LIMA	Laboratoire d'Ingénierie des Microsystèmes Avancés
LUT	Look Up Table
max	maximum
MEMS	Micro Electro Mechanical System
min	minimum
MOSFET	Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor
PCB	Printed Circuit Board
PID	Proportional Integral and Derivative control
PWM	Pulse width Modulation
QFN	Quad Flat No-leads package
R&D	Research and Development
ref	reference
RO	Ring Oscillator
RTA	Rapid Thermal Annealing
SLPM	Standard Litre Per Minute (SLM ou SLPM)
SMT	Surface mount technology
TIR	Thermographie infrarouge
TL	Thermal landing
TL	Thermal Landing
UT	unité de traitement
RD	Radial Board
DB	Detector Board
AD	Adaptor Board
P2P	Pumped two phase

NOMENCLATURE

Symbole	Définition	unité
<i>D ou d</i>	Diamètre	[m]
<i>A</i>	Area - surface	[m ²]
<i>C_p</i>	Chaleur spécifique	[J/kgK]
<i>E</i>	Écoulement de fluide (Liquid Flow)	[SLPM]
<i>h</i>	Coefficient de transfert de la chaleur convective	[W/m ² K]
<i>H</i>	Hauteur, ou taux d'humidité	[m] ou %
<i>I</i>	Courant électrique	[A]
<i>k</i>	Conductivité thermique	[W/mK]
<i>L ou l</i>	Longueur	[m]
<i>Nu</i>	Nombre de Nusselt	[-]
<i>P</i>	Pression	[N/m ²]
<i>P_s</i>	Pression statique	Pa
<i>P_D</i>	Puissance dissipée	[W]
<i>Pr</i>	Nombre de Prandtl	[-]
<i>r</i>	Rayon	[m]
<i>R</i>	Résistance électrique	[Ω]
<i>Re</i>	Nombre de Reynolds	[-]
<i>SPL</i>	Sound pressure level in air relative to the human ear	[dBA]
<i>T</i>	Température	[°C] ou [K]
<i>v</i>	Vitesse	[m/s]
<i>V</i>	Voltage	[V]

α	Angle d'impact de jet	[°]
κ	Diffusivité thermique	[m ² /s]
θ	La résistance thermique	[°C /W]
ψ	La résistance de caractérisation thermique	[°C /W]

ABSTRACT

LabPET IITM is a new-generation preclinical PET scanner project for medium-sized animals (rabbits). It is currently in its last phase of development. Several improvements are being sought with the new generation of avalanche photodiode emission tomography (PET-PDA) positron emission tomography detectors. These enhancements will help enhance the resolution of images to detect details below the millimeter (previously impossible to detect).

In LabPET II a PET sensor element (pixel) is composed of a scintillator crystal (LYSOL) coupled to a PDA for a total of 18432 pixels. These are aligned over the inside perimeter of the cylinder (64 x 288 facing inwards) to form the scanner's field of view. A "Detector Board" (DB) which is a PCB has two ASICs (on the first surface) and 64 pixels (on the second). The ASICs integrate the front-end electronics, which constitute the data acquisition and signal processing circuits coming from the pixels.

The thermal stability of pixels and ASICs is very important for optimal performance in PDA-PET. In LabPET II, the DB temperature must remain stable at a maximum of 32 °C within $\pm 2\%$. The problem lies in the complex structure of the scanner and in the fact that the ASIC is a major heat source (0.6 W). ASICs are placed near pixels and both are confined in little spaces. This placement is advantageous from an electrical stand point (for reasons of optimization of the S / N ratio, timing, etc.), but it is catastrophic from a thermal stand point. Our measurements show that the surface temperature of the DB reaches 75 °C in permanent mode (with natural convection at room temperature).

In this thesis we adopted a two-phase design and development approach: Quantify the problem first and then optimize the solution.

In a first phase, we show our thermal characterization results of the DB in a special space. We obtained these results with a combination of empirical and analytical methods. These methods mainly use IR thermographic measurements and discrete analysis over thermal gradients. Our results show that a practical forced air convection method is effective to cool and stabilize the DB and its pixels if certain conditions are met.

In a second phase, we developed and optimized the Cellular Air Impingement (CAI) thermal stabilization method for the LabPET II scanner. This method uses a system with cold plates to cool and stabilize the convective air temperature. Radiators are installed on the ASICs and a convective air distribution system supplies a sea of cells. The latter will cool and stabilize the DBs and pixels the temperature (and probably other parts of the scanner). Convective air temperature and static pressure in the distribution system are controlled by PID controllers.

RÉSUMÉ

LabPET IITM est un projet de scanner TEP préclinique nouvelle génération pour animaux de taille moyenne (lapin). Il est actuellement dans sa dernière phase de développement. On cherche à apporter plusieurs améliorations grâce à la nouvelle génération des détecteurs de tomographie d'émission par positrons à base de photodiodes d'avalanches (TEP-PDA). Ces améliorations vont aider à rehausser la résolution des images pour détecter des détails sous le millimètre (autrefois impossible à déceler).

Dans LabPET II un capteur élémentaire TEP (pixel) est composé d'un cristal scintillateur (LYSOL) couplé à un PDA pour un total de 18432 pixels. Ces derniers sont alignés sur le périmètre intérieur du cylindre (64 x 288 avec la face vers l'intérieur) pour former le champ de vision spatial du scanner. Une « Detector Board » (DB) qui est un PCB comporte deux ASICs (sur la première surface) et 64 pixels (sur la deuxième). Les ASICs intègrent l'électronique frontale qui constitue les circuits d'acquisitions de données et de traitement des signaux en provenance des pixels.

La stabilité thermique des pixels et des ASICs est très importante pour une performance optimale dans les PDA-TÉP. Dans LabPET II, la température des DB doit rester stable à moins de $32\text{ °C} \pm 2\%$. La problématique réside dans la structure complexe du scanner et dans le fait que l'ASIC est une source majeure de chaleur (0,6 W). Les ASICs sont placés à proximité des pixels et les deux sont confinés dans des espaces très restreints. Ce placement est avantageux du point de vue électrique

(pour des raisons d'optimisation du rapport S/B, de synchronisme, etc.), mais il est catastrophique du point de vue thermique. Nos mesures montrent que la température de surface de la DB atteint 75 °C en mode permanent (avec une convection naturelle à la température ambiante).

Dans cette thèse, nous avons adopté une approche de conception et de développement à deux phases : quantifier le problème d'abord pour ensuite optimiser la solution.

Dans une première phase, nous montrons nos résultats de caractérisation thermiques de la carte DB dans un espace spatial. Nous avons obtenu ces résultats avec à partir des méthodes empiriques et analytiques. Ces méthodes utilisent surtout des mesures thermographiques IR et des analyses discrètes sur des gradients thermiques. Nos résultats montrent qu'une méthode pratique à convection d'air forcé est suffisamment efficace pour refroidir et stabiliser la DB et ces pixels sous certaines conditions.

Dans une deuxième phase, nous avons développé et optimisé une méthode de stabilisation thermique dite cellulaire par impact de jets d'air (Cellular Air Impingement (CAI)) pour le scanneur LabPET II. Cette méthode utilise un système à des plaques froides pour refroidir et stabiliser la température de l'air convectif. Des radiateurs sont installés sur les ASICS et un système de distribution de l'air convectif alimente une mer de cellules. Cette dernière va refroidir et stabiliser la température des DB et des pixels (et probablement d'autres parties du scanneur). La température de l'air convectif et la pression statique dans le système de distribution sont contrôlées par des contrôleurs PID.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Dans la vie moderne, la technologie est devenue une routine indispensable. L'électronique est intégrée dans la plupart des équipements et des systèmes qui gèrent la vie quotidienne de l'être humain et sur lesquels notre vie est devenue axée et dépendante.

La sécurité et la fiabilité ont été et restent une grande préoccupation dans le secteur de la technologie. La réponse des composants électroniques à base de semiconducteurs est dépendante de la grandeur thermique. Tout composant électronique à base de semiconducteur dégage de la chaleur lorsqu'il est parcouru par un courant électrique. Donc toute conception de circuit électronique doit tenir compte de la grandeur thermique. D'un côté, sous-estimer les aspects thermiques d'un système vont affecter directement sa fiabilité et sa performance [1]; et d'un autre côté, surestimer le problème thermique mène à une solution non optimale et coûteuse ce qui est indésirable dans les marchés très compétitifs d'aujourd'hui.

La gestion thermique dans un circuit électronique commence par étudier son modèle thermique. Ce modèle thermique doit identifier : les sources de chaleur, les composants sensibles à la variation de température, et les résistances thermiques dans la structure et dans son entourage (normalement, c'est l'air ambiant). Ce modèle thermique servira à quantifier le problème thermique d'un système. Donc, à déterminer et à optimiser les méthodes de conception, d'intégration, et de mise en œuvre du système de gestion thermique.

1.1 LE PROJET LABPET II

L'équipe de recherche du laboratoire d'ingénierie des microsystèmes avancés de l'UQO (LIMA) [2], le groupe de recherche en appareillage médical de Sherbrooke (GRAMS) [3], le centre d'imagerie moléculaire de Sherbrooke (CIMS) [4] (ce sont deux laboratoires de recherche de l'université de Sherbrooke), et Gamma Medical Inc. (GMI), collaborent ensemble à la recherche et au développement d'un

appareil préclinique d'imagerie nucléaires qui est le LabPET IITM. Ce projet est basé sur des années de recherche et d'expertise dans le domaine de l'imagerie nucléaire. Une première version (de taille d'un souris) a été réalisée [5] (LabPET I) il y a environ dix ans. Dans cette deuxième version (LabPET II - lapin), on cherche à apporter plusieurs améliorations grâce à la nouvelle génération des détecteurs de tomographie d'émission par positrons à base de photodiodes d'avalanches (TEP-PDA). Ces améliorations vont aider à rehausser la résolution des images pour détecter des détails sous le millimètre (autrefois impossible à déceler [6]), et à agrandir le diamètre interne du scanner (à la taille d'un lapin).

1.2 PRINCIPE DE L'IMAGERIE NUCLÉAIRE PAR TEP-PDA

Le TEP-PDA consiste à introduire dans le corps du sujet (un être humain ou un animal) un traceur radioactif comme l'isotope de fluor (^{18}F) ou FDG (fluorodésoxyglucose) [7, 8]. Le traceur est formulé de manière à être concentré ou absorbé par un organe ou par une certaine partie du corps du sujet (selon l'objectif de la détection). Alors qu'il est à l'intérieur du corps du sujet et pour se stabiliser, l'isotope radioactif émet de façon aléatoire dans le temps (pendant une demi-vie de l'isotope radioactif) des positrons [9]. Un positron antimatière qui possède une charge positive ne peut pas survivre si longtemps et il perd très rapidement son énergie cinétique avant de s'annihiler un à un avec un électron (charge identique, mais opposée au positron) de la matière moyenne. Cette annihilation en résulte un éclat de deux faisceaux de rayons gamma séparés de 180° . Chaque faisceau a une signature énergétique égale à 511 keV [8, 10] et voyage à une vitesse égale à celle de la lumière ($\approx 3 \text{ m / ns}$) (figure 1.1).

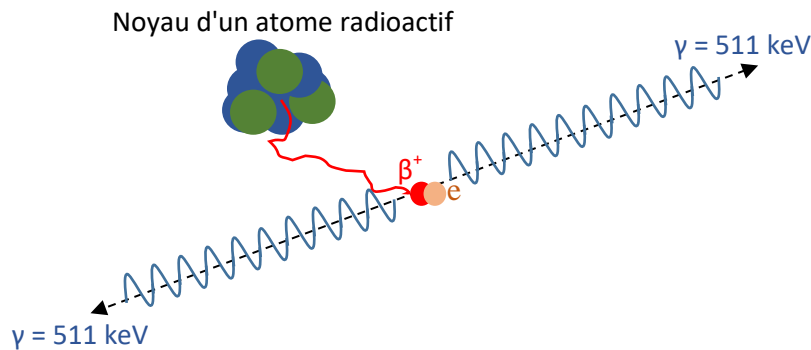


Figure 1.1. L'émission d'un positron et l'annihilation électron-positron résultent en un éclatement de deux faisceaux gamma de 511 keV chacun. Ces faisceaux voyagent dans des directions opposées (180°) à une vitesse égale à 3 m / ns .

Pour construire une image TEP, un scanner PET-PDA utilise un réseau d'anneaux circulaires (cylindre) de détecteurs ou de pixels (figure 1.2). Les pixels sont alignés sur le périmètre intérieur du cylindre, face vers l'intérieur (la profondeur du cylindre est émise pour simplifier la vue). Le sujet sera placé au centre de ce cylindre, bien aligné au champ de vision (CDV) des détecteurs. Un pixel est composé d'un cristal scintillateur couplé à une photodiode à avalanche (PDA). Le cristal arrête un rayon gamma entrant et convertit son énergie à une lumière dans le spectre visible. Le PDA à son tour, convertit cette énergie lumineuse détectée en une énergie électrique et l'amplifie. Ce signal électrique sera converti en une information numérique et il sera dirigé à une unité de traitement (UT). Le rôle de l'UT est de faire l'association de chaque détection au même événement dans l'espace et dans le temps. Comme les annihilations se déclenchent de manière aléatoire dans toutes les directions, uniquement celles dont le tir est aligné avec le CDV (les deux gammas qui tracent une ligne droite entre deux détecteurs sur le cylindre), elles seront détectées et utilisées pour construire l'image TEP [9].

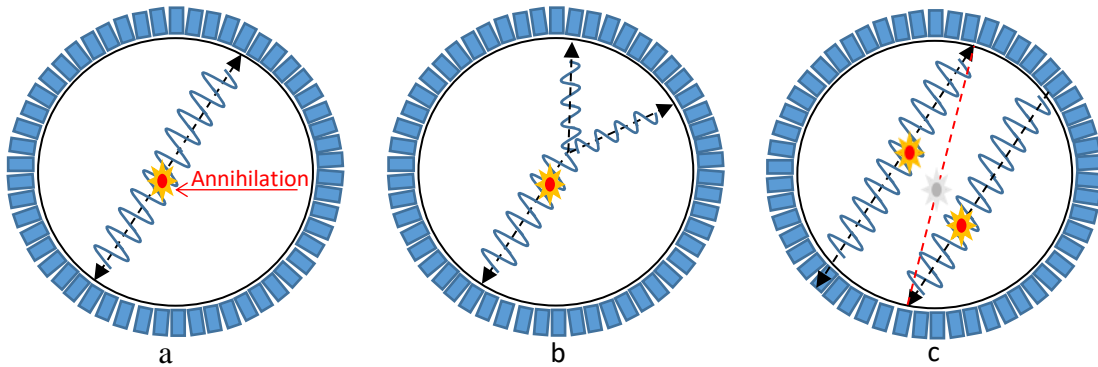


Figure 1.2. a) Une véritable annihilation de coïncidence ; b) Annihilation affectée par la diffusion de Compton ; c) Montre l'effet fortuit.

Une technique de fenêtrage (résolution temporelle de coïncidence) qui est de quelques centaines de picosecondes à quelques nanosecondes de largeur [11] et de temps de vol [10, 12] est utilisée pour identifier et tracer le point d'origine de chaque annihilation dans un espace de 3D [12, 13, 14]. Les chercheurs poussent pour encore réduire de plus le fenêtrage à moins de 100 ps [10]. La figure 1.2-a montre le cas d'une détection idéal (véritable coïncidence) dans laquelle une paire de deux gammas de 511 keV provenait de la même annihilation et séparé par 180° détectés dans la même fenêtre sur deux pixels opposés. Malheureusement, seul un faible pourcentage d'annihilations produit une véritable coïncidence. La détection de la figure 1.2-b est affectée par un phénomène appelé diffusion de Compton [15] dans laquelle l'un des deux gammas de la même annihilation est diffusé dans le corps du sujet avant d'être détecté par deux détecteurs (au lieu d'un seul), de sorte que le niveau d'énergie (511 keV) sera divisé entre les deux détecteurs. La figure 1.2-b montre une seule diffusion, mais en réalité, une diffusion multiple peut également se produire, ce qui augmente davantage le taux de rejet. La figure 1.6-c montre un effet appelé Fortuite [15] dans lequel deux annihilations tombent dans la même fenêtre temporelle, mais l'un des deux gammas de chaque annihilation tombe en dehors du CDV. Par conséquent, les

deux autres gammas détectés restants seront faussement associés au même événement. Cet effet indésirable peut être réduit en améliorant la résolution du temps de coïncidence. Un algorithme traite les données et les sépare en deux catégories (acceptés ou rejetés). L'image TEP sera construite uniquement à partir des annihilations acceptées (les vraies coïncidences qui peuvent être associées à un point dans l'espace). L'image TEP en 3D sera principalement construite à partir des points qui ont été acceptés et accumulés pendant un temps de détection t_d .

Dans le TEP-PDA l'image est construite à partir des pixels spatiaux et des événements aléatoires détectés et traités dans le temps. Alors non seulement la résolution spatiale, mais aussi la précision temporelle et la quantification précise des signatures énergétiques qui vont déterminer la qualité de l'image TEP [13, 16]. Il y a encore la stabilité thermique des pixels TEP qui est un facteur très important qui influence directement la qualité et la résolution de l'image TEP-PDA.

LabPET II est un TEP-PDA typique. Pour atteindre l'objectif en termes de résolution sous le millimètre, on a réduit la taille du pixel, ajouté davantage des rangées additionnelles des pixels en profondeur pour augmenter le CDV et diminué le fenêtrage de 7 [ns] à environ 3,7 [ns] [13]. Un pixel détecteur dans LabPET II est composé d'un cristal de scintillation couplé à un PDA (c'est un pixel de la résolution spatiale). Malgré toutes ces améliorations, il est impossible d'atteindre cet objectif si la température des détecteurs n'est pas stabilisée. Dans la prochaine section, nous allons discuter du problème de surchauffe et de stabilité thermique dans les TEP-PDA et dans le scanner LabPET II.

1.3 IDENTIFICATION DU PROBLÈME THERMIQUE

1.3.1 Problème de la stabilité thermique dans les TEP-PDA

La réponse des composants du détecteur TEP-PDA dépend de la température. Le rendement lumineux du cristal scintillateur et le gain du PDA diminuent avec l'augmentation de la température [17]. Le bruit thermique (bruit de Johnson) [18] dans les PDA augmente avec la température et il sera amplifié par le gain élevé du PDA (30 à 200) [19, 20]. Cette dépendance de la réponse du détecteur TEP-PDA sur la variation de température entraîne une dépendance thermique de la performance du scanner.

L'électronique frontale qui constitue les circuits d'acquisition de données et de traitement des signaux des détecteurs TEP-PDA est la source principale de la puissance dissipée P_D . Cette dernière est une énergie électrique transformée en chaleur par l'effet de joule. Lorsqu'une partie de P_D sera dissipée par la structure d'un détecteur TEP-PDA à proximité, la réponse électrique de sortie de ce dernier sera détériorée. De même, les circuits d'acquisition de données et de traitement des signaux sont eux-mêmes dépendants de la température. Et ils peuvent affecter principalement le rapport signal/bruit et la résolution temporelle d'une détection TEP [17, 21, 22]. Cette résolution temporelle est également limitée par le courant d'obscurité (Dark current) dans les PDA qui est dépendant de la température [23, 24]. Toutefois, les PDA sont le maillon le plus faible dans la chaîne par rapport à l'instabilité thermique et qui contribue davantage à la dégradation de la performance globale d'un scanner TEP-PDA.

1.3.2 Complexité de la structure du scanner LabPET II

La figure 1.3 montre une représentation compréhensive du scanner LabPET II. Les composants d'électroniques frontaux sont intégrés dans un CI à application spécifique (ASIC) de 180 nm [17, 21, 22]. Chaque circuit imprimé de détection

(Detector Board (DB)) contient deux ASICs et chaque ASIC manipule 32 pixels. Un pixel constitue d'un canal de cristal scintillateur couplé à un PDA. Un cristal scintillateur est de type d'orthosilicate de lutécium dopé au cérium (cerium doped lutetium yttrium orthosilicate $\text{Lu}_x\text{Y}_{2-x}\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LYSO) scintillator crystals) [25] et il est composé d'une matrice de 4x4 canal de cristal scintillateur. Un substrat en céramique (tampon en sandwich) est utilisé pour supporter 64 PDA et 4 cristaux LYSO (64 pixels en total) et il est installé directement sur la surface deux (opposée à la surface où se trouvent les ASICs). Chaque DB est connecté à une carte adaptateur (Adapter Board (AB)). Chaque huit AB sont connectés à une carte radiale (Radial Board (RB)), et qui consiste une rangée du cylindre du scanner. Le scanner utilise 36 RB pour former un cylindre complet des pixels spatiaux du scanner (18432 pixels).

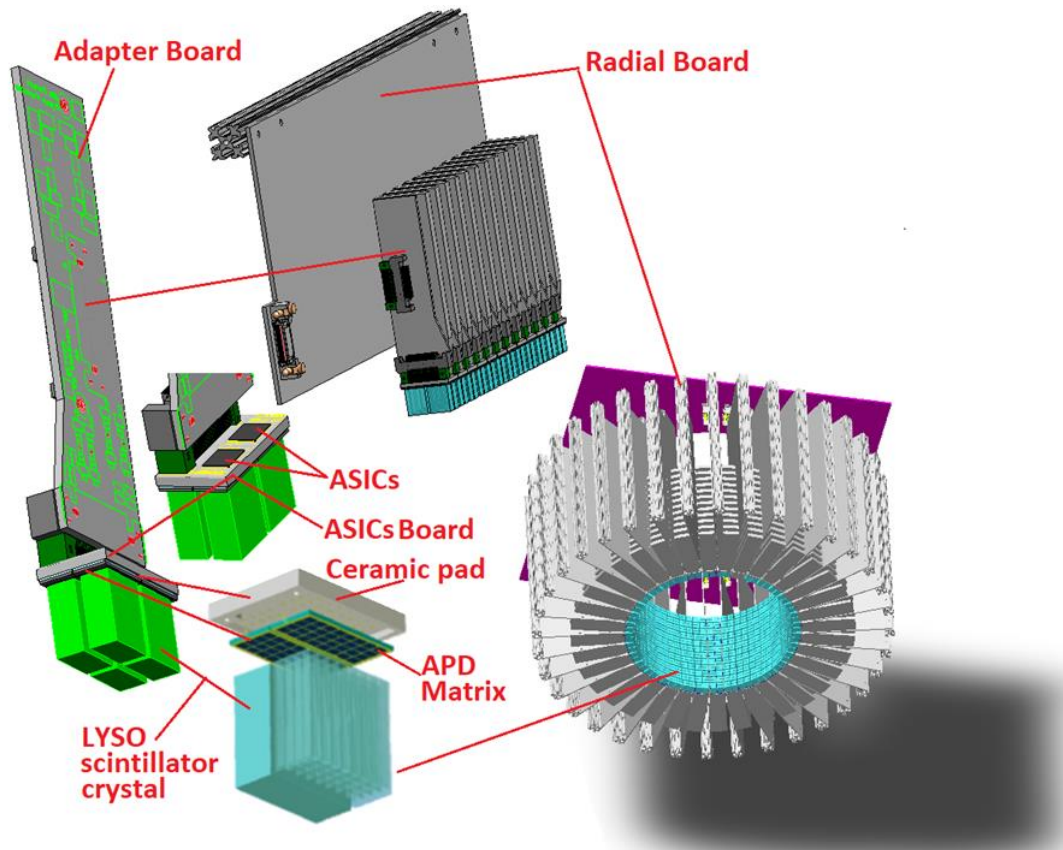


Figure 1.3. Éléments et représentation du scanneur LabPET II.

1.3.3 Le défi thermique dans LabPET II

Pour éviter la perte de signal et pour résoudre des problèmes liés à la résolution temporelle, les ASICs sont placés à proximité des pixels (Figure 1.3). En moyen, chaque ASIC dissipe une puissance P_D égale à 550 mW en mode veille (standby) et de 600 mW en mode détection, donc une source non négligeable de chaleur. L'anneau du scanneur contient un total de 576 ASICs (un total de 345,6 W de puissances dissipées). Ces sources de puissances dissipées vont sûrement affecter la performance du scanneur. La figure 1.3 montre la distribution dense des cartes tout autour du cylindre des détecteurs, donc la complexité de cette configuration d'un point de vue structurel et thermique [26] est évidente. Des sources de chaleur

majeures (les ASICs et autres composants) sont situées dans des espaces très restreints entre chaque paire de RB et d'AB qui forme quatre murs tout autour de chaque carte DB. Chaque carte DB forme un « plancher » entre quatre murs. La figure 1.4-a montre la surface 1 d'une DB. C'est la surface du plancher qui comporte les deux ASICs et qui a une surface égale à 7,7 mm x 23,4 mm (n'inclus pas le connecteur). Le connecteur sert à accorder la DB à l'AB. La figure 1.4-b montre l'autre surface de la DB, qui comporte les pixels qui forment la surface interne du cylindre.

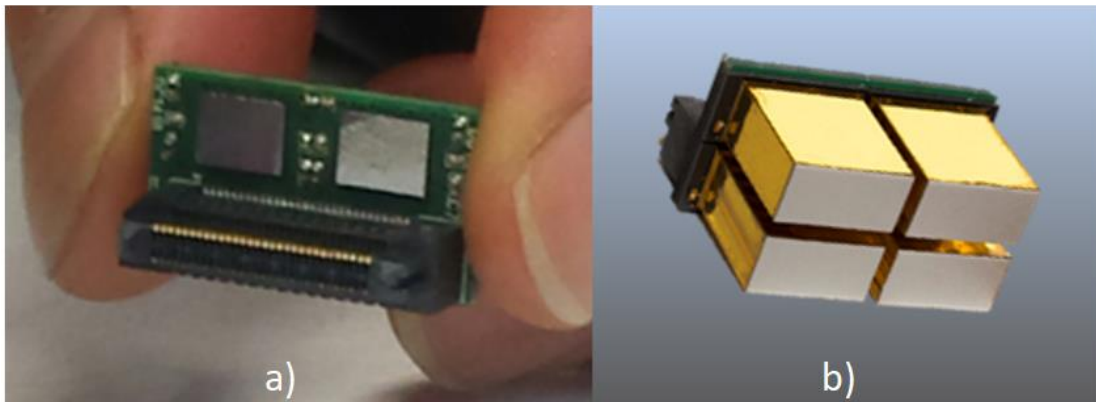


Figure 1.4. Image d'une DB. a) montre la surface 1 de la DB et ces deux ASICs. b) montre la surface 2 et les 4 cristaux de scintillateur (les PDA et le substrat en céramique sont cachés par les cristaux).

Nous avons effectué des mesures et des analyses thermiques préliminaires non destructives par méthode de thermographie infrarouge (TIR) [27, 28] et des capteurs thermiques à délai de ligne (Line Delay Detector (LDD)). Ces mesures ont montré que : dans quelques minutes de la mise sous tension du scanneur, la température interne d'un ASIC a dépassé 80 °C, la température de boîtier de l'ASIC a dépassé 75 °C et de la DB qui a dépassé 70 °C. Donc la surchauffe des DBs est critique ce qui rend le scanneur non fonctionnel.

Une expérience était effectuée sur le scanner LabPET II qui utilisait une température régulière de $27 \pm 0,5$ °C pour le détecteur et l'électronique frontale (en particulier pour les PDAs) [19]. Ce dernier a reporté que : les résultats étaient généralement satisfaisants. Cependant, dans la représentation polaire du test, l'image TEP a montré des artefacts en anneau difficiles à éliminer en raison de petites fluctuations de l'efficacité du détecteur. Ces fluctuations ont été entraînées par une mauvaise régulation de la température. Ces résultats montrent l'importance de la stabilité thermique dans les TEP-PDA.

La figure 1.5 montre la réponse caractéristique en fonction de la température (pour un niveau de détection donné constant comme référence) d'un pixel du scanner LabPET II. La courbe montre la dégradation du niveau de la réponse en fonction de l'augmentation de la température pour la même quantité d'énergie en [keV] à l'entrée du PDA. Alors pour que la bonne signature énergétique (en forme d'impulsions) soit conservée, il faut que la température des détecteurs (et surtout les PDAs) reste stable et proche de la température ambiante (25 °C) durant toute la période d'une détection. Toute augmentation ou instabilité dans la température des PDA cause une augmentation du taux de rejet et dégrade la qualité des images TEP.

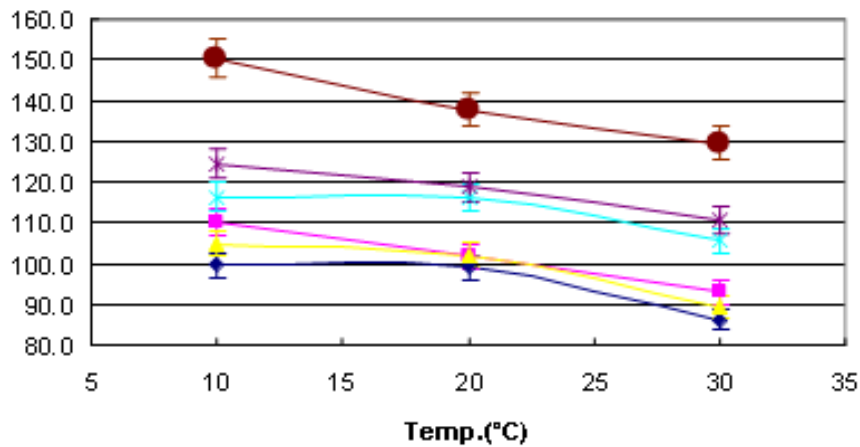


Figure 1.5. Réponse caractéristique de la sortie d'un PDA (couplé à un cristal scintillateur) en fonction de la température pour un niveau de détection donné constant comme référence.

1.3.4 Mon mandat au sein du projet LabPET II

Comme membre de l'équipe de laboratoire LIMA de l'UQO, mon mandat dans ce projet consiste à faire la caractérisation thermique des détecteurs de tomographie d'émission par positrons à base de photodiodes d'avalanches (TEP-PDA) du scanner LabPET II, et de trouver une solution efficace pour stabiliser la température des TEP-PDAs. Donc dans cette section nous allons exposer les problèmes thermiques dans les TEP-PDA et plus précisément dans le scanner LabPET II.

1.4 LES MOTIVATIONS

Être membre d'un mégaprojet industriel multidisciplinaire qui consiste d'une équipe de travail compétitive et dynamique. Donc le climat positif du travail et la synergie d'équipe fournissent à tous les membres de l'équipe plusieurs avantages comme : la partage des connaissances, s'entraider pour résoudre problèmes multidisciplinaires, publications, etc.

Travailler sur un projet pour améliorer les performances d'un scanner préclinique. Donc contribué à la recherche et au développement des technologies pour avancer et améliorer l'imagerie TEP.

Étendre mes connaissances et recherches bibliographiques pour répondre aux exigences d'un projet multidisciplinaire qui touche les domaines de génie mécanique, électrique, électronique, informatique, et la TEP. Donc, apprendre à utiliser une approche multidisciplinaire pour faire le lien et mettre le tout dans un seul ouvrage compréhensif. Non seulement la recherche bibliographique, mais aussi les méthodes de mesures et les analyses sont encore multidisciplinaires et très diversifiées ce qui m'a aidé beaucoup à élargir ma base de connaissance.

1.5 LES OBJECTIFS

Notre objectif principal est de livrer au projet LabPET II une solution thermique pratique et optimale. Cette solution va répondre aux besoins de refroidissement et de stabilisation thermique des DB du projet LabPET II tout en respectant son cahier de charge. La faisabilité et la performance de cette solution seront démontrées par des méthodes empiriques. Nous allons généralement développer et utiliser des méthodes de mesures thermiques par thermographie IR pour extraire des caractéristiques thermiques des surfaces.

Deux étapes d'exécutions sont distinctement identifiables sont la caractérisation thermique de la DB et le développement de la méthode de refroidissement et de stabilisation thermique par convection d'air forcé et dirigé.

Pour la caractérisation thermique, nous allons d'abord développer le modèle thermique pour le DB du LabPET II. Pour cela, nous allons développer une

méthodologie de mesures pour extraire les données nécessaires pour que nous puissions répondre à la question scientifique suivante : est-ce qu'une méthode de convection à l'air forcé et dirigé est suffisante pour répondre aux besoins thermiques de stabilisation et de refroidissement du scanneur LabPET II ?

Si la réponse à la question précédente était affirmative, nous allons maintenant développer une méthodologie de mesures pour extraire des données comparatives sur la méthode de refroidissement et de stabilisation thermique cellulaire par impact de jets d'air (CAI).

Ces données vont aider à visualiser et à optimiser plusieurs paramètres (ou variables) qui gèrent la convection forcée et dirigée. Aussitôt que ces paramètres seront optimisés directement sur la structure réelle du scanneur LabPET II. Cela constituera la solution finale optimale qui doit respecter les pires conditions environnementales d'utilisation de ce dernier.

Le cahier de charge exige que : la température maximale d'un PDA ne doive pas dépasser 32 °C avec une fluctuation maximale plus petite que $\pm 2\%$ durant une détection ;

La température de la jonction maximale d'un ASIC doit toujours être plus petite à T_{JMAX} (la température maximale que l'ASIC peut supporter).

1.6 CONTRIBUTIONS ET ORIGINALITÉ DE LA THÈSE

L'originalité de ce travail est dans les méthodes de caractérisations thermiques et dans la méthode proposée de refroidissement et de stabilisation thermique dite cellulaire par impact de jet d'air (CAI). Cette solution a été développée et vérifiée sur un vrai produit commercial qui est le scanneur LabPET II.

Nous avons développé sur mesure le CAI pour le scanneur de nouvelle génération LabPET II. D'abord LabPET II est un nouveau scanneur TEP sous-développement qui possède une structure unique et très complexe (d'un point de vue structurel et thermique). Comme notre solution thermique fait partie intégrale de ce méga projet industriel unique et original elle est par définition unique et originale.

L'industrie de la technologie PET utilise un liquide comme médian de convection de la chaleur. La stabilisation par liquide est efficace, mais les inconvénients sont nombreux comme le coût élevé, risque de fuite du liquide, et toutes ces tuyauteries qui entraînent le liquide compliquent beaucoup la tâche de maintenance du scanneur. Notre méthode utilise l'air comme médian de convection. Tout en remplaçant le liquide par l'air, nous éliminons déjà toutes les inconvénients reliés à l'utilisation du liquide.

Au niveau des méthodes de caractérisations thermiques de la carte de détecteur (DB). Nous avons développé et appliqué des méthodes basées sur la thermographie infrarouge (IR) et de traitement numérique des images IR. Ces méthodes permettent d'obtenir des caractéristiques thermiques dans un espace spatial à partir des gradients thermiques. Ces gradients seront mesurés sur toute la surface visée plutôt que des estimations à partir des valeurs scalaires locales obtenues à l'aide des thermocouples (comme il est spécifié par le standard industriel JEDEC [29]).

Les modèles du standard JEDEC traitent des problèmes thermiques avec une source unique de P_D et un PCB de 4 couches. La DB de LabPET II comporte 2 sources de chaleur et un PCB de 12 couches. Le standard JEDEC concentre sur la dissipation de chaleur à partir de la jonction d'un composant de puissance dans la structure et dans l'air ambiant. Donc le refroidissement du composant en question. Dans LabPET II nous cherchons à refroidir plusieurs composants de puissances (576 ASICs) et à stabiliser la température de la surface 2 de la DB (288 surfaces). Donc des méthodes de caractérisations et des solutions originales.

1.7 JUSTIFICATION DE LA RECHERCHE

Cette section montre les sources principales de nos recherches et revues de la littérature. Nous avons utilisé le logiciel Endnote offert par l'UQO pour gérer les références dans cette thèse avec le style IEEE. Nous avons servi de nombreuse base de données mise à notre disposition par l'UQO [30] et par l'Université d'Ottawa [31].

Nous avons utilisé les ouvrages généraux comme les livres disponibles dans les bibliothèques et sur le web pour les théories de base et les principes de la physique.

Les fiches techniques, les notes techniques et les standards industriels sont tous disponibles sur le web, et plus précisément sur les sites des manufacturiers comme TI et sur les sites de standardisations comme JEDEC.

Nous avons suivi les références dans les journaux pour tracer la source de l'article.

Qui suit est une liste de majeures bases de données et sources d'informations que nous avons consultée :

Google et Google Scholar : des moteurs de recherches incontournables de Google. Et d'autres moteurs de recherche comme : FreeFullPDF, PubGene, Scientific Commons, BASE, MyScienceWork et CiteSeerX.

IEEE Xplore couvre les domaines de génie électrique, informatique et électronique. Couvre des publications publiées depuis 1988 (et une partie du contenu publié depuis 1913) par IEEE dans leurs revues, normes, transactions, travaux des congrès ainsi que par IET dans leurs revues et travaux des congrès.

SCOPUS est une base de données multidisciplinaire comprenant des revues scientifiques, des livres et des actes de conférences. Les domaines de recherche inclus dans cette base sont les sciences, la technologie, la médecine, etc.

ScienceDirect donne accès à plus de 11 millions d'articles de revues en texte intégral et à des chapitres de livres provenant de la littérature scientifique fondamentale. Et encore des revues médicales françaises d'Elsevier Masson.

PubMed (Medline) donne accès à MEDLINE, PREMEDLINE, des bases de données connexes et des liens à certains périodiques électroniques.

JSTOR est une de données multidisciplinaires donnant accès aux collections rétrospectives des périodiques dans les domaines des arts, des sciences, des sciences humaines et sociales.

Elsevier e-book Collection est une collection multidisciplinaire de livres numériques.

Érudit donne accès à des revues scientifiques du Québec.

1.8 ORGANISATION DE LA THÈSE

Cette thèse est organisée en cinq chapitres de la manière suivante :

Le chapitre 1 présente la fondation du sujet et la formulation du problème. Nous commençons par une introduction générale sur le problème thermique dans l'électronique. Par la suite nous passons à l'introduction de notre sujet d'étude principal qui est le projet LabPET II. Dans la section de LabPET II, nous formulons la problématique et le défi thermique dans ce dernier. Nous finissons ce chapitre tout en exposant nos objectifs, motivations et contributions à cette thèse.

Le chapitre 2 présente nos revues de la littérature et états de l'art. Comme cette thèse est basée sur un projet multidisciplinaire, ce chapitre montre une certaine diversification. Nous commençons d'abord notre revue de littérature par une introduction générale sur les principes et la théorie de transfert de chaleur. Ensuite, nous continuons avec un exposé des méthodes de modélisations thermiques dans l'électronique. Et nous passons à la convection forcée, aux nombres caractéristiques sans dimensions et enfin une petite introduction au contrôle numérique des procédés thermiques, à la thermographie infrarouge, ses techniques de mesure, avantage et limitation.

À partir de la section 2.10, nous passons graduellement de la littérature générale et des principes vers les états de l'art qui couvre : les aspects thermiques, les technologies alternatives, et les méthodes et systèmes de refroidissement modernes. Ces technologies et techniques sont présentées et brièvement discutées en soulignant leurs avantages et leurs points faibles par rapport à notre problématique (si applicable).

Chapitre 3 : Nous montrons nos méthodes et résultats de la caractérisation thermique de la DBs. Des méthodes de caractérisations thermiques innovatrices dans un espace spatial sont présentées.

Chapitre 4 : traite la méthode de la CAI. Nous présentons la méthodologie et l'optimisation des résultats obtenus avec la manipulation de plusieurs paramètres de convection forcée et leurs effets sur la réponse thermique de la DB.

Chapitre 5 : La conclusion. Nous récapitulons nos contributions et les travaux futurs en relation avec cette thèse.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE ET ÉTAT DE L'ART

Nous commençons d'abord ce chapitre par une revue des principes générale, et nous divergeons par la suite vers un état de l'art plus étroit en relation avec notre thèse.

2.1 LA RÉSISTANCE OHMIQUE ET LA PUISSANCE DISSIPÉE DANS LES CIRCUITS ÉLECTRIQUES

Tout courant électrique dans un conducteur électrique dégage de la chaleur, car tout conducteur électrique possède une certaine résistance ohmique. Donc une certaine quantité de l'énergie électrique est convertie en énergie thermique dans les résistances ohmiques par l'effet de Joule [32].

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.1)$$

où, I est le courant électrique dans le conducteur [A];

R est la résistance ohmique du conducteur [Ω];

t est le temps [sec];

Q est la quantité de chaleur générée [j].

Par conséquent tout courant électrique qui traverse un composant électrique ou électronique (passif ou actif) va générer de la chaleur.

La puissance dissipée P_D dans une résistance électrique est la quantité d'énergie électrique convertie en chaleur :

$$P_D = \frac{Q}{t} = I^2 \cdot R \quad (2.2)$$

Où, P_D est la puissance dissipée [j/s ou W].

2.2 SOURCE DE LA PUISSANCE DISSIPÉE DANS LES CIRCUITS INTÉGRÉS CMOS.

Généralement, dans les circuits intégrés (CI) CMOS (Complementary Metal-Oxide-Substrate), le transistor à effet de champs (FET) ou (MOSFET) est considéré comme l'unité de base avec lequel des circuits plus complexes sont construits. Lorsque le transistor conduit un courant électrique entre le drain et la source (à travers son canal), P_D sera générée (selon équation (2.2)). La figure 2.1 montre le circuit interne d'un MOSFET à canal n. Selon les propriétés de ce dernier, lorsqu'un canal est établi la densité des porteurs de charges électriques (électrons) tout au long du canal n'est pas uniforme [33,ch 6]. En conséquence, la résistance électrique n'est pas uniforme, car elle est dépendante de la distribution des porteurs dans le canal. Alors, la grande partie de la chaleur sera dissipée près du drain où le canal est pincé et donc la résistance électrique du canal est à son maximum. Pour cette raison même, dans les MOSFET de puissance, le drain est toujours connecté à la partie métallique du boîtier où le transfert de chaleur est le plus efficace avec l'air ambiant.

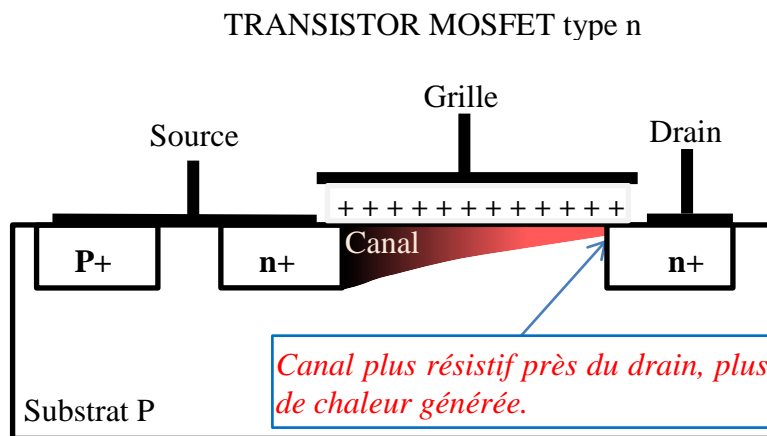


Figure 2.1. Circuit interne d'un MOSFET à canal n⁺.

$P_D(\text{totale})$ d'un CI est égale à la somme de $P_D(\text{transistor})$ de tous les transistors dans ce CI.

2.3 LA GESTION THERMIQUE DANS LES CI

La gestion thermique dans les CI est un élément important pour assurer leurs fiabilités. Avec la réduction de l'échelle dans les procédés de fabrication, la densité de transistors dans les CI par unité de surface a énormément augmenté. La conséquence directe de cette augmentation de densité de transistors est la puissance dissipée par unité de surface. La température excessive et cyclique (en conjonction avec la contrainte thermoélectrique résiduelle dans les couches minces) dans les composants électroniques est la cause principale de leur défaillance. Même si la température n'est pas trop élevée, la durée de vie d'un CI qui fonctionne à des températures cycliques répétitives de plus que $12\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ sera gravement réduite [34, 35]. Une bonne gestion thermique des CI doit tenir compte de ces deux facteurs importants.

2.3.1 Principes de transfert de chaleur dans le contexte des CI

En physique, il y a trois principes de transfert de chaleur, sont : la conduction, la convection et la radiation [36,ch.3, 37, 38].

2.3.1.1 La conduction

La conduction en électronique est le processus par lequel la chaleur passe d'une zone de température supérieure (normalement à partir de la jonction ou noyau d'un composant) à une température inférieure dans un même milieu (boîtier du composant, PCB, etc.). C'est le transfert de chaleur entre deux ou plusieurs solides qui sont physiquement en contact direct. Ce principe est montré par la loi de conduction thermique de Fourier.

$$P_D = \kappa \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

Où, P_D est la puissance dissipée du CI [W] ;

κ est la conductivité thermique du matériau [W/m·K] ;

A est la surface transversale du transfert de chaleur [m²] ;

$dT = (T_1 - T_2)$ est la différence de température entre les deux surfaces [K] ;

dx est l'épaisseur du matériau [m].

2.3.1.2 La convection

La convection est le transfert de chaleur entre une surface solide et un fluide (gaz ou liquide). La convection est dite naturelle ou libre, si le mouvement de fluide est excité par la chaleur de la surface chaude. Le fluide absorbe une certaine quantité de la chaleur de la surface il devient moins dense que le fluide supérieur donc il s'élève et sera remplacé par le fluide plus froid (plus dense) et ainsi de suite. Alors, ce phénomène est généralement géré par les différences de densité dans le fluide dues aux gradients de température et par la gravité. Par contre la convection est dite forcée si le mouvement de fluide est géré par moyen mécanique contrôlable comme par exemple une pompe. Le taux de transfert de chaleur est généralement exprimé par la loi de refroidissement de Newton [36,ch.3, 37], .

$$P = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Où, P est la puissance dissipée par convection [W] ;

h est le coefficient de transfert de chaleur convective [W/m²·K] ;

A est la surface de transfert de chaleur [m²] ;

$\Delta T = (T_S - T_\infty)$ est la différence de température [K] ;

T_S est la température de la surface [K] ;

T_∞ est la température du fluide [K].

2.3.1.3 La radiation

Le transfert par radiation est l'énergie thermique (sous forme d'ondes électromagnétiques infrarouges) émise par une surface chaude. Et cette radiation est absorbée par d'autres corps dans le champ de vue de la source de radiation [36,ch.3, 37].

$$P_R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \Delta T_R^4 \quad (2.5)$$

Où, P_R est la puissance radiée [W] ;

ε est l'émissivité radiative ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) ;

σ est la constante Stefan-Boltzmann de la puissance de radiation émise du corps noir $5,67 \times 10^{-8}$ [W/m² · K⁴] ;

$\Delta T_R = (T_{R2}^4 - T_{R1}^4)$ est la différence de température radiée (Tsurface-Tambiante) [K] ;

A est la surface émissive de la radiation [m²].

En électronique, la radiation IR est généralement négligée dans les modèles thermiques des circuits, et surtout dans la convection forcée [38]. Cependant, la radiation est très utile dans le domaine de la thermographie infrarouge (TIR).

2.4 LE CALCUL THERMIQUE DANS L'ÉLECTRONIQUE ET LES CI

En général, dans l'industrie de l'électronique, il est courant d'utiliser la résistance thermique plutôt que la conductance pour le calcul thermique. De cette façon, on établit une analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques comme il est montré dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Équivalents thermiques des grandeurs électriques.

Électriques		Thermiques	
Source de courant	Ampère [A]	Source de chaleur P_D	Watt [W]
courant	Ampère [A]	Puissance dissipée P_D	Watt [W]
Voltage	Volt [V]	Température T	Degré Celsius [°C]
Capacitance électrique	Farad [F]	Capacitance thermique C_T	[J/°C]
Résistance électrique	Ohm [Ω]	Résistance thermique θ	[°C/W]
Impédance électrique	Ohm [Ω]	Impédance transitoire $\theta(t)$	[°C/W]

On obtient la résistance thermique à travers d'un parallélépipède rectangle tout en réarrangeant la loi de conduction thermique de Fourier (2.3) ce qui donne :

$$\theta = \frac{dx}{k \cdot A} = \frac{dT}{P_D} = \frac{T_2 - T_1}{P_D} \quad (2.6)$$

Où, d est l'épaisseur dans la direction de flux [mm] ;

A est la surface [mm²] ;

k est la conductivité [W/°C] ;

dT est le changement de température des deux plans perpendiculaires à la direction du flux de chaleur [°C] ;

P_D est la puissance que représente le flux de l'énergie thermique d'un plan vers l'autre [W].

L'équation (2.6) est considérée comme la loi d'ohm thermique. Elle pourrait être utilisée pour résoudre des problèmes thermiques plus complexes comme un réseau des résistances thermiques (Méthode de résistance équivalente) [37].

La capacitance thermique magasinée dans un parallélépipède rectangle est donnée par :

$$C_T = H \times M = \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.7)$$

Où, Dans un passage d'un régime transitoire au régime permanent :

ΔT est la variation de la température dans l'objet [$^{\circ}\text{C}$] ;

$\Delta E = Q$ est la quantité de chaleur absorbée par l'objet pour ΔT [J] ;

Dans un régime permanent :

M est la masse de l'objet [gr] ;

H est la chaleur massique [J/g- $^{\circ}\text{C}$].

La capacité thermique spécifique est la capacitance thermique d'une substance par unité de masse (g), donc en introduisant la masse dans (2.7) on obtient :

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.8)$$

2.5 MODÈLE THERMIQUE D'UN CIRCUIT INTÉGRÉ

En réalité P_D totale d'un CI quelconque est généré aléatoirement sur la surface de la puce selon l'emplacement et la contribution de chaque transistor individuel. Mais en pratique, à cause de la petite surface de la puce, on néglige la notion de la surface de l'équation (2.3). Alors on présente la source de chaleur et les autres grandeurs thermiques comme des valeurs scalaires. Tout manufacturier de CI définit les paramètres thermiques d'un composant dans sa fiche technique respective. Ces paramètres thermiques sont généralement établis selon les normes spécifiées par «Joint Electron Device Engineering Council» (JEDEC) [39].

La figure 2.2 montre un modèle (circuit) thermique typique d'un CI [40, 41]. La résistance thermique entre la jonction (noyau du CI) et la température ambiante est donnée par :

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CA} = \frac{T_J - T_A}{P_D} \quad (2.9)$$

Où, θ_{JA} est la résistance thermique entre la jonction et la température ambiante [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];

θ_{JC} est la résistance thermique entre la jonction et le boîtier [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];

θ_{CA} est la résistance thermique entre le boîtier et l'ambiante [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$];

T_J est la température de la jonction dans un régime permanent [$^{\circ}\text{C}$];

T_A est la température ambiante [$^{\circ}\text{C}$].

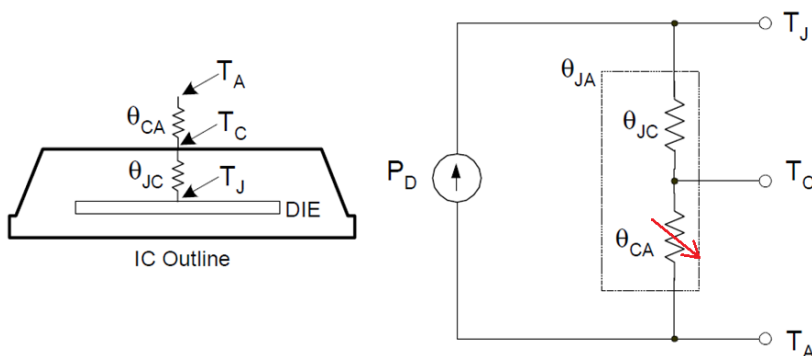


Figure 2.2. Le modèle thermique typique d'un CI (AN862) [40]

θ_{JC} est une résistance thermique entre deux solides qui représente une conduction (ou un écoulement) de chaleur entre les deux solides [42]. Ces solides ont une structure relativement stable par rapport à une variation raisonnable de température. Alors, la conduction est regardée stable dans les calculs thermiques.

θ_{CA} et θ_{JA} sont deux résistances thermiques entre solide et fluide qui représentent une convection entre solide et fluide [42]. La convection est variable, car elle dépend de plusieurs facteurs (que nous allons les voir dans les prochaines sections). La fiche technique d'un composant donné spécifie les valeurs numériques pour ces résistances thermiques. Généralement, ces valeurs sont obtenues par une procédure de mesure et un environnement contrôlé selon le standard JEDEC. Dans un environnement d'application réel, ces valeurs convectives sont variables et loin d'être

constantes. Avec une convection forcée, nous pouvons réduire les résistances convectives pour améliorer l'évacuation de chaleur de la surface d'un composant.

2.5.1 La dissipation thermique maximale dans les CI et le facteur de réduction (Power Derating)

La température maximale de T_J (T_{JMAX}) et la valeur maximale de P_D (P_{DMAX}) sont normalement indiquées dans la fiche technique d'un CI. Ils sont les valeurs extrêmes que la jonction (le noyau) du CI peut supporter. Si ces limites sont dépassées, le risque de défaillance et des dommages permanents est grand [34]. L'équation suivante établit la relation entre ces deux valeurs extrêmes :

$$P_{DMAX} = \frac{T_{JMAX} - T_C}{\theta_{JC}} \quad (2.10)$$

Où, P_{DMAX} est la puissance dissipée maximale [W] ;

T_{JMAX} est la température maximale de la jonction [°C]

La figure 2.3 montre le facteur limitant de la dissipation de puissance pour des températures supérieures à la température de fonctionnement maximale spécifiée. Le facteur de réduction est équivalent à : $-\frac{1}{\theta_{JC}}$ (pente de la courbe). Par exemple, on peut avoir $P_{DMAX} = 150$ W si et seulement si on peut assurer que T_C reste égale ou plus petite que 12 °C. La courbe montre que P_{DMAX} sera réduite à zéro quand T_C atteint 125 °C.

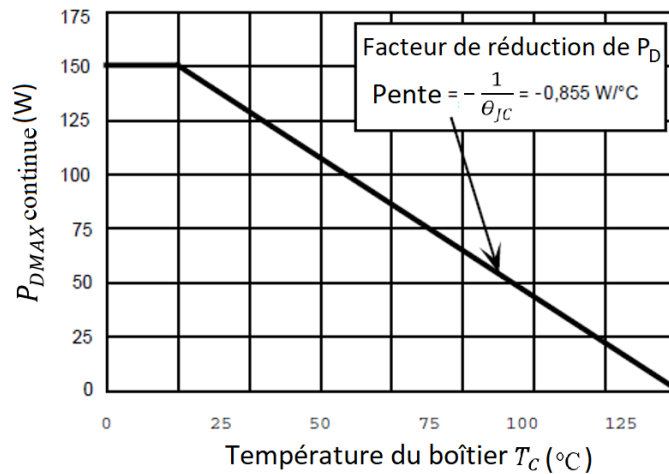


Figure 2.3 Dissipation de puissance vs température du boîtier [43]

Dans les circuits CMOS numériques, ce facteur de réduction sera établi selon le fonctionnement du circuit. Généralement c'est la puissance dynamique qui contribue à ce facteur. La puissance dynamique est la somme de deux puissances : la puissance transitoire et la puissance des charges capacitives [44]. La puissance dynamique est principalement générée au niveau des canaux des transistors MOSFET durant la commutation d'un niveau logique vers l'autre. Donc elle augmente avec la vitesse de l'horloge et avec le nombre de transitions par secondes dans le CI. Par exemple, la température d'un microprocesseur augmente avec la quantité ou le taux de données traitées par seconde. Pour respecter ce facteur de réduction, un système de contrôle surveille constamment la température du CI. Si la température dépasse un seuil prédéfini, le système intervient pour réduire la vitesse d'horloge dont la puissance dissipée dans le microprocesseur.

2.6 LE TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION FORCÉE

La convection forcée est une méthode efficace pour refroidir, contrôler et stabiliser la température dans l'électronique. En général, la température du fluide

convectif et sa vitesse sont les deux paramètres contrôlables. L'efficacité de la convection forcée dépend encore de plusieurs autres facteurs comme les propriétés physiques du fluide, la géométrie de la surface et la nature du mouvement du fluide et de son interaction avec la (les) surface(s), etc. L'air est le fluide convectif le plus utilisé en électronique pour refroidir les surfaces chaudes. Par exemple un ventilateur ou une soufflante (blower) pour augmenter le débit d'air et le transfert thermique. L'air froid sera appliqué soit directement au-dessus du boîtier du composant chaud ou à l'intermédiaire d'un dispositif de refroidissement passif, comme un radiateur. Le radiateur aide à réduire la résistance convective entre la surface chaude et l'air convectif. Pour des solutions de refroidissement plus efficace, on utilise un fluide comme l'huile ou l'eau pour augmenter l'efficacité de transfert thermique. Le tableau 2.2 montre quelques valeurs typiques de coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle et forcée [37, 45].

Tableau 2.2 Valeurs typiques du transfert de chaleur convective de quelques fluides [45].

Typical values of the convective heat transfer	
Process	h ($W/m^2 \cdot K$)
Free convection	
Gases	2 - 20
Liquids	50 - 1000
Forced convection	
Gases	25 - 300
Liquids	100 - 40,000
Convection with phase change	
Boiling or condensation	2500 - 100,000

Le transfert de chaleur par convection est plus complexe à analyser que le transfert de chaleur par conduction. Aucune propriété du moyen de transfert de chaleur telle que la conductivité thermique ne peut être définie pour décrire le mécanisme. Donc le transfert par convection est géré par les propriétés du fluide convectif comme la conductivité thermique, la densité et la chaleur spécifique, la

viscosité dynamique, et la vitesse du fluide. Et également par le type d'écoulement et de son interaction avec la surface du solide comme la géométrie et la rugosité de la surface. Toutes ces conditions affectent en particulier l'épaisseur du film stagnant [46].

Généralement le transfert par convection forcé est résolu par des nombres caractéristiques sans dimension comme Nusselt, Reynolds et Prandtl. Mais pratiquement, l'analyse de transfert de chaleur par convection forcée est traité empiriquement (surtout lorsque l'écoulement est turbulent). Le calcul d'une convection forcée est très complexe, car il implique un mouvement de fluide ainsi qu'une conduction thermique à l'intérieur de ce fluide même. Il y a récemment une tendance vers la simulation par dynamique des fluides computationnelle (CFD) comme SolidWorksTM Flow et ANSYSTM FLUENT et Icepak (pour les PCBs). Mais pour avoir une bonne simulation réaliste, il faut bien représenter la structure et les matériaux composant l'objet (par exemple un PCB à plusieurs couches avec plusieurs composants qui dégage la chaleur). Encore, il faut bien choisir le modèle turbulent selon les conditions. Si on ne choisit pas le bon modèle, l'erreur peut monter à plus de 22% [47].

2.6.1 Les principaux nombres caractéristiques de la convection et leurs significations

2.6.1.1 Le nombre Reynold :

Le nombre Reynold est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Il sert à prédire si une condition d'écoulement sera laminaire ou turbulente. Pour un écoulement interne (par exemple dans un tube), un Re moins de 2000 indique un écoulement laminaire, entre 2000 et 4000 l'écoulement est instable (région transitoire), et plus que 3500 il est turbulent (figure 2.4) [48].

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (2.11)$$

Où, V est la vitesse d'écoulement [m/s] ;

D est une dimension linéaire caractéristique (longueur parcourue du fluide ; diamètre hydraulique, etc.) ;

ρ densité du fluide [kg/m^3] ;

μ viscosité dynamique [Pa s] ;

ν viscosité cinématique [m^2/s], $\nu = \mu/\rho$.

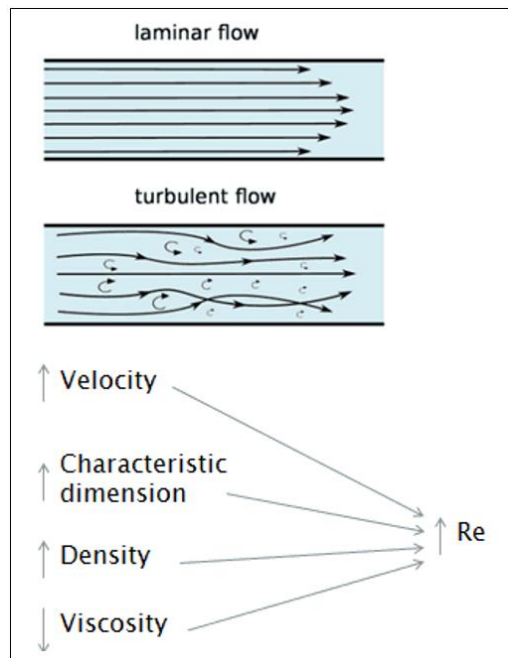


Figure 2.4. Écoulement interne a) laminaire, b) turbulent

2.6.1.2 Les diamètres hydrauliques :

Le diamètre hydraulique donne l'équivalent cylindrique de diamètre équivalent des conduits non circulaires (figure 2.5). Le diamètre hydraulique sert à calculer le nombre Reynold [48] .

$$Re_D = \frac{\rho V D_H}{\mu} = \frac{V D_H}{\nu} \quad (2.12)$$

Où, D_H est le diamètre hydraulique ;

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (2,13)$$

Où, A est la surface interne, et P est le périmètre (total des parois en contact avec l'écoulement de fluide).

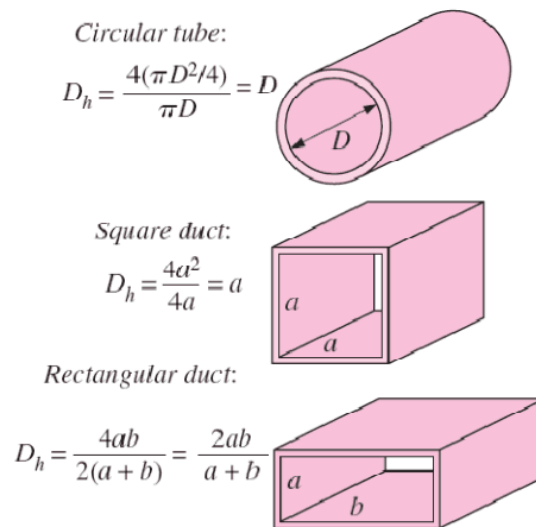


Figure 2.5. Les diamètres hydrauliques de quelques formes populaires [48].

2.6.1.3 Le nombre Reynold et l'écoulement externe :

L'équation (2.11) décrit directement l'écoulement externe. La figure 2.6 montre un écoulement externe sur une surface plane. Les vecteurs de vitesse (U_0) à $x = 0$ sont égaux à tous les niveaux (y). En avançant sur la surface dans la direction de x le mode d'écoulement change avec la distance. Juste au début (à partir de $x=0$), les nombres de Reynolds sont petits et la couche limite est laminaire. À mesure que l'on s'éloigne de $x=0$, la vitesse dans l'écoulement change uniformément. La vitesse du fluide sur la surface est nulle ($y(0) = 0$) à cause de la contrainte de cisaillement (la grandeur de cette contrainte dépend des caractéristiques et de la rugosité de la surface). Plus qu'on avance sur l'axe des x , le nombre de Reynolds graduellement augmente jusqu'à un certain point où l'écoulement devient instable. Et encore plus loin sur x , les nombres de Reynolds atteignent la zone où la couche limite devienne

turbulente. La transition de la couche limite laminaire à la couche turbulente se produit lorsque Re_x dépasse 500000 [48].

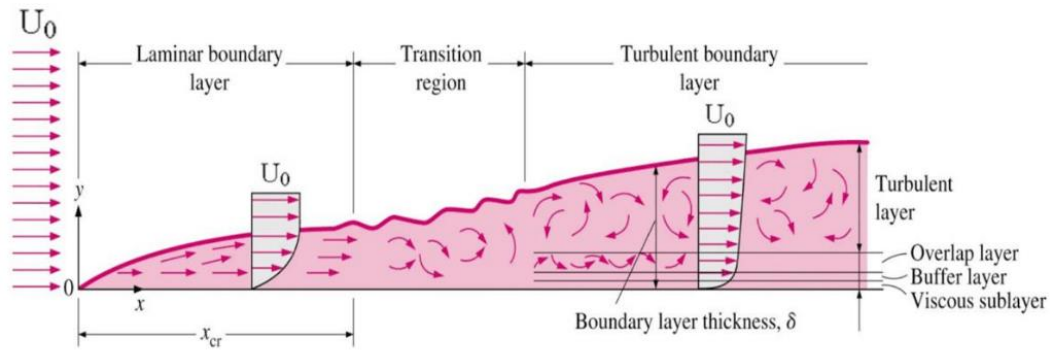


Figure 2.6. Évolution de l'écoulement de fluide sur une surface plane (x) pour un écoulement externe [48].

L'épaisseur de la couche limite définit la distance entre la surface et le point où la vitesse est égale à 99% de la vitesse de l'écoulement libre. L'épaisseur δ des couches limites laminares sont définies par :

Pour un écoulement laminaire

$$\delta \approx \frac{5,0}{\sqrt{Re_x}} x \quad (2,14)$$

Et pour un écoulement turbulent

$$\delta \approx \frac{0,37}{Re_x^{1/5}} x \quad (2,15)$$

2.6.1.4 Le nombre Reynold et l'écoulement interne :

Dans un écoulement interne, par exemple un tube, on distingue plusieurs régions. La région d'entrée du fluide dans le tube l'écoulement est presque invisible (à

viscosité négligeable), il converge et pénètre dans le tube (figure 2.7). Pour caractériser cette région, la longueur d'entrée hydrodynamique est approximée par [49, ch. 6] :

$$\frac{L_e}{D} = \begin{cases} 0,05 Re & \text{Pour un écoulement laminaire} \\ 1,36 Re^{1/4} & \text{Pour un écoulement turbulent} \end{cases} \quad (2.16)$$

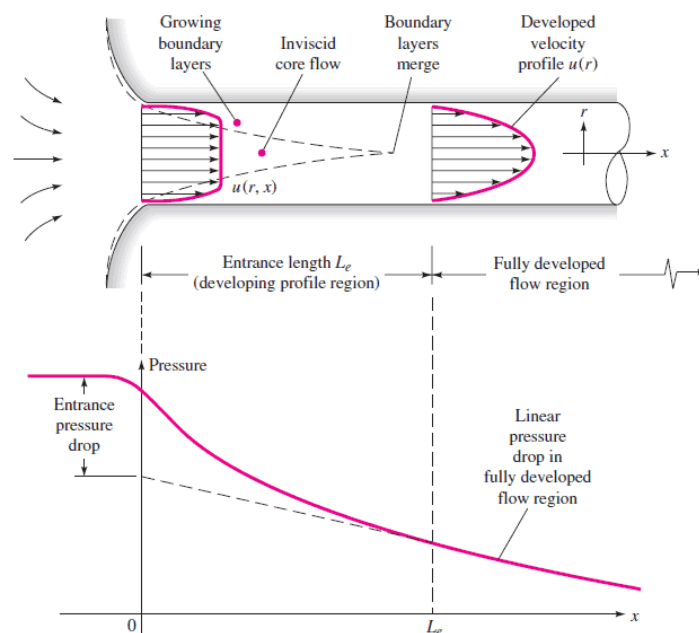


Figure 2.7. Développement des profils de vitesse et des changements de pression d'un écoulement à l'entrée d'un conduit [49, ch. 6].

La longueur hydrodynamique maximale est la plus longue longueur de développement possible à l'entrée du tube. Elle est définie (par exemple pour un écoulement laminaire) par $L_e = 0,05 Re D$, où D est le diamètre du tube. À partir de cette distance, le flux devient complètement développé. Dans un écoulement turbulent, les couches limites se développent plus rapidement et L_e est relativement plus court [45, 49, ch. 6].

2.6.1.5 Le nombre Prandtl :

Le nombre de Prandtl est défini comme le rapport entre la diffusivité du moment (viscosité cinématique) et la diffusivité thermique du fluide. La diffusivité du moment indique la résistance du matériau à l'écoulement du fluide sous cisaillement en fonction de sa densité [45, 50, ch.6].

Le numéro de Prandtl est donné par :

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/(c_p/\rho)} = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (2.17)$$

Où, α est la diffusivité thermique [m^2/s];

μ est la viscosité dynamique [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$];

k est la conductivité thermique [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$];

ρ est la densité [kg/m^3];

c_p est la chaleur spécifique [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$].

Si P_r est petit cela signifie que le fluide diffuse la chaleur rapidement par rapport à sa vitesse (la diffusion par conduction est plus significative par rapport à la convection). Tableau 2.3 montre une liste de quelques liquides

Tableau 2.3 Liste de la viscosité cinématique et PR de quelques fluides [45].

Fluid	Kinematic viscosity [m^2/s]	Prandl Number
Air	16.96×10^{-6}	0.699
Carbon dioxide	9.294×10^{-6}	0.76
Hydrogen	118.6×10^{-6}	0.684
Water	0.657×10^{-6}	4.34
Mercury	0.109×10^{-6}	0.0252
Glycerine	223×10^{-6}	2450

2.6.1.6 Le nombre Nusselt :

Le nombre Nusselt est le ratio de convection/conduction (les équations (2.4) / (2.3)). C'est le rapport entre la convection de l'énergie thermique au fluide et la conduction de l'énergie thermique dans le fluide. Il est égal au gradient de température sans dimension à la surface du solide. Nu fournit une mesure sur le transfert de chaleur par convection au fluide sur la surface chaude [45]. Un Nu plus grand que 100 indique un écoulement turbulent.

$$Nu_L = \frac{h\Delta T}{k_f \frac{\Delta T}{L}} = \frac{hL}{k_f} = f(Re_L, Pr) \quad (2.18)$$

Où, k_f est la conductivité thermique [W/m.K] ;

L est la longueur caractéristique [m] ;

h est le coefficient de transfert de chaleur par convection [W/m².K].

On peut démontrer Nu_L avec le développement de la couche limite thermique sur une surface plane isothermique avec un écoulement de fluide non perturbé (figure 2.8). Sur le bord d'attaque, le profil de température est uniforme, où $T(y) = T_\infty$. En avançant dans la direction de x sur la surface plane, la partie du fluide qui entre en contact avec cette surface atteignent un équilibre thermique. Et par conduction cette partie de fluide échange la température dans le fluide même. Ce phénomène produira un gradient de température dans le fluide (conduction dans le fluide) limité par la courbe :

$$\delta t(x) = \frac{T_S - T}{T_S - T_\infty} = 0,99 \quad (2.19)$$

Où $\delta t(x)$ est la couche limite thermique [50, ch.6].

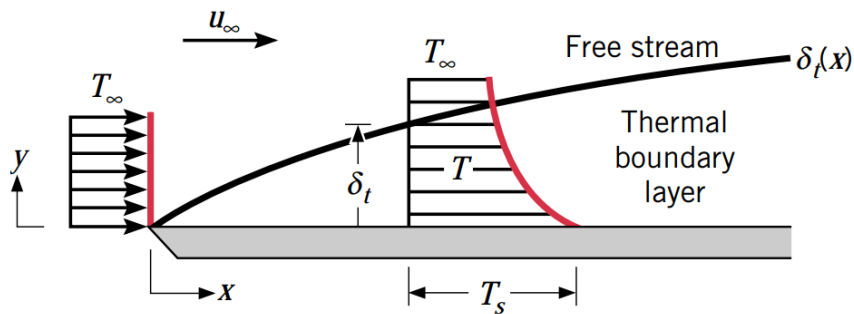


Figure 2.8. Développement de la couche limite thermique sur une surface plane isothermique [50, ch.6].

Nous pouvons maintenant mettre en contexte Nu comme suit : le transfert de la chaleur à la surface est convectif. Alors, à toute distance x du bord d'attaque, l'écoulement de chaleur local dans le fluide sur cette surface est décrit par la loi de Newton en $y = 0$ (équation (2.4)). Et l'équation (2.3) décrit le gradient de température entre la surface et la couche limite thermique. Combinant les deux équations donne :

$$q_y = h(T_s - T_\infty) \quad (2.4 - a)$$

$$q_y = -\kappa \frac{d}{dy} (T - T_s) \Big|_{y=0} \quad (2.3 - a)$$

$$\frac{h}{k} = \frac{\frac{d}{dy} (T_s - T) \Big|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (2.20)$$

Multiplions par L (la longueur caractéristique) les deux côtés ce qui donne le nombre Nusselt :

$$Nu_L = L \frac{h}{k} = L \frac{\frac{d}{dy} (T_s - T) \Big|_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (2.21)$$

2.7 LA CONVECTION FORCÉE PAR JET D'IMPACT

L'impact de jets est l'un des processus de refroidissement par convection forcée le plus intense. Donc le transfert de chaleur est le plus efficace [51].

Figure 2.9 montre le principe de la méthode de refroidissement par jet d'impacts. Figure 2.9-a montre plusieurs orifices de jets qui sont montés directement au-dessus du centre des boîtiers des IC. Cette configuration force le jet de liquide de refroidissement qui est normal à la surface, de frapper intensivement cette dernière. Figure 2.9 -b et -c montrent les différentes régions et conditions limites. Dans la figure 2.9 -c en particulier, on remarque le développement de l'écoulement sur la surface du solide. Dans la figure 2.9 -b on identifie les trois zones : jet libre, de stagnation, et flux radial ou de paroi.

La zone de jet libre est la région où le fluide quitte l'orifice ou la buse et qu'il n'est pas encore largement affecté par l'impact sur la surface solide. Cette région est estimée d'être à une distance de 1,5 le diamètre hydraulique à partir de la surface d'impact. Un noyau potentiel existe dans la région du jet libre dans lequel la vitesse de sortie du jet est conservée et le niveau d'intensité de la turbulence est relativement faible. À l'entourage du noyau, la vitesse sera réduite et l'écoulement devient plus turbulent à cause d'une couche de cisaillement avec le fluide ambiant.

La zone d'impact ou de stagnation s'étend jusqu'à un emplacement radial défini par la propagation du jet. Cette zone comporte le point de stagnation où la vitesse moyenne du fluide est nulle et le jet libre sera dévié dans l'écoulement de jet radial.

Au-delà de la zone radiale, l'écoulement s'étend et se développe dans la paroi (wall) (figure 2.9 -c).

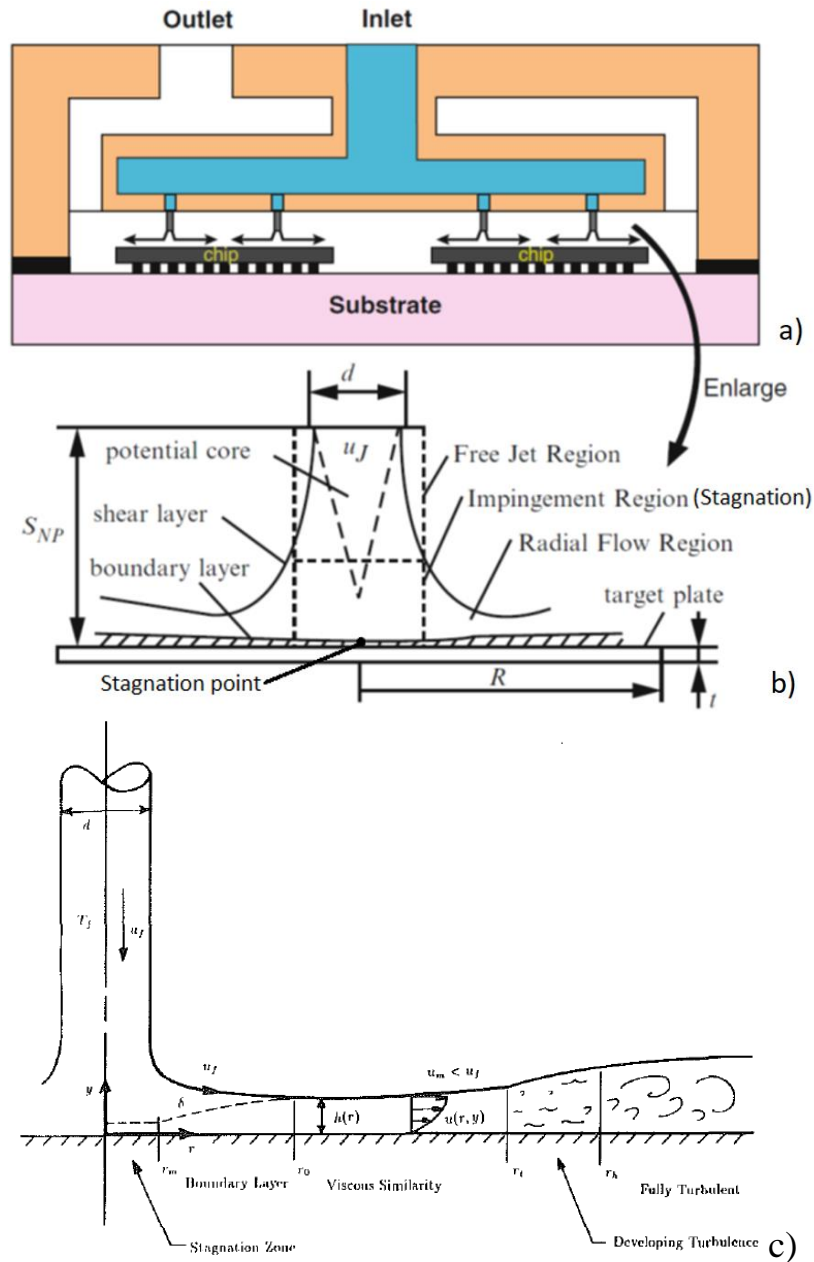


Figure 2.9. a) Convection submergée à jet d'impact pour refroidir les IC, b) et c) montre les régions et conditions de cette convection. [52, p432], c) [53]

Sans rentrer beaucoup dans les détails, plusieurs facteurs peuvent affecter le jet, par exemple : l'angle de projection, la géométrie de la buse [54, 55, 56], caractéristiques du fluide et des parois [57, 58].

2.7.1 Le paramètre h/D dans le jet d'impact

Un paramètre important dans la technique de jet d'impact est le rapport h/D . h/D est le rapport de la distance entre la buse et la surface, et le diamètre hydraulique de la buse. La forme et le gradient de température sur la surface sont affectés par ce rapport. Si h/D est petit, on peut avoir des piques thermiques secondaires intensives sur la surface [59]. Pour un jet avec un écoulement constant ou stable, on réduit h/D et le nombre Reynold [60]. Nous allons revoir une étude plus détaillée sur l'effet d' h/D et Re un peu plus tard dans ce chapitre.

2.8 LE CONTRÔLE THERMIQUE NUMÉRIQUE

Pour une stabilisation thermique, un écoulement doit être contrôlé. En terme général, quel que soit le procédé à contrôler, le rôle d'un système de contrôle est d'assurer que le plant ou le procédé (Process) reste contrôlable et stable à la valeur de la consigne. Dans un contrôleur thermique, la consigne pourrait être la température ou la vitesse du fluide de convection (ou les deux). Les tout premiers contrôleurs étaient à temps continus. Ils ont été construits à l'aide des circuits électroniques analogiques. Ils sont robustes performants, mais leurs paramètres ne sont pas facilement modifiables, car ils sont reliés directement au matériel. Dans les applications modernes, les contrôleurs numériques programmables ont dominé le marché. Ils sont plus avantageux que les analogues termes d'immunité au bruit, coût, flexibilité et utilisation de surface [61]. La plupart des contrôleurs aujourd'hui sont numériques et ils sont implémentés sur des machines binaires séquentielles (Ordinateurs, Processeur embarqué, DSP, FPGA, ASIC, etc.) [62]. Pour concevoir un contrôleur numérique, on doit connaître les limitations de la machine numérique sur laquelle il sera

implémenté. Par exemple une machine numérique ne peut pas intégrer [63, p. 57]. Alors, pour résoudre des équations différentielles dans ces derniers, on utilise des approximations numériques (des intégrations numériques). Ou parfois directement des compensations numériques. Lorsqu'on parle d'une approximation dans un système numérique, on parle de la résolution ou d'une incertitude dans les résultats obtenus par rapport à un modèle réel. Pour cette raison, on refait généralement à la réponse d'un contrôleur analogique pour évaluer la qualité de la réponse d'un contrôleur numérique. Il y a une relation directe entre la résolution et la vitesse de calcul. Un contrôleur analogique ne peut pas être présenté dans une machine numérique, car il requiert un nombre infini de données donc un nombre infini de ressources matérielles ce qui n'est pas réalisable. Alors, dans la conception d'un contrôleur numérique, il faut toujours faire un compromis entre la résolution, performance et coût de fabrication.

Un contrôleur numérique est un système discret (SD). Dans un SD, il faut bien définir la résolution temporelle (nombre d'échantillons par seconde). La résolution temporelle est déterminée par le temps d'échantillonnage kT (sample and hold (S/H)). Un très grand kT (par rapport à la bande passante du procédé) est un gaspillage inutile de ressources et d'énergie. Par contre, un petit kT donne un rendement imprédictible et instable, car entre chaque deux kT consécutif (durant la période de « Hold »), le contrôleur est comme « aveugle », donc inconscient de ce qui passe dans le procédé. En pratique, un kT d'environ 30 fois la bande passante est suffisant pour donner un rendement acceptable et en accord avec le rendement d'un contrôleur analogique [63, p. 57]. Un autre paramètre important dans les SD est la résolution binaire RB. RB affecte la précision du contrôleur. Un système de contrôle numérique de n bits a une RB maximale de 2^{n-1} (zéro à 2^{n-1} niveaux possible). On doit bien choisir la valeur RB, car une très grande résolution (plus que nécessaire) est un gaspillage des ressources. Encore une très petite valeur de RB donne une mauvaise régulation et possiblement une instabilité dans le contrôle. La figure 2.10 montre le

bloc-diagramme d'un système de contrôle numérique à boucle fermée. Dans un contrôleur numérique, une horloge (Clk) stable est essentielle. L'instabilité de l'horloge affecte directement la période d'échantillonnage kT et la réponse du contrôleur. Encore sans rentrer dans les détails, la synchronisation est très importante dans un contrôleur numérique pour assurer que l'accès aux données suit une séquence sera bien déterminé.

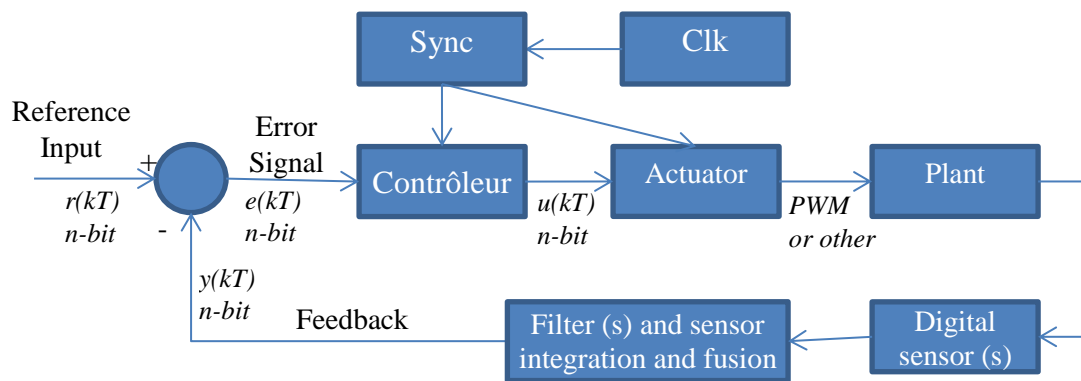


Figure 2.10. Bloc-diagramme d'un système contrôlé numériquement avec une boucle de compensation de retour.

Le rôle du capteur (Sensor) est de fournir l'information au contrôleur sur la valeur actuelle du plant. Un contrôleur pourrait être 100% numérique, donc il fournit une information numérique (par exemple capteur de température à ligne de délai ou un RO) [64].

Un contrôleur à boucle fermée comme le P, PI ou PID (Proportional + Integral + Derivative) est très populaire dans l'industrie pour les applications de contrôle thermiques. On doit bien choisir le contrôleur qui convient mieux à son application. Un contrôleur P donne un temps de réponse vite, mais une erreur résiduelle non nulle, un PI réduit cette erreur à zéro, et en ajoutant le dérivé on améliore la réponse au changement brusque (ce qui n'est pas essentiel pour le

changement relativement long de la température). Sans rentrer dans les détails, il y existe plusieurs méthodes pour le réglage des gains de ces paramètres par exemple la méthode du cycle ultime et 'Good Gain' [65]). Mais le réglage n'est pas simple et demande de l'expérience pour : éliminer les oscillations dans la boucle, optimiser le temps de réponse, réguler la charge, le dépassement sur la consigne ...etc. [66, 67].

2.9 LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

La thermographie infrarouge (TIR) est une technique parmi plusieurs pour produit une carte thermographique d'une surface. [68] montre plusieurs exemples de la thermographie appliquée dans le domaine de l'électronique et de semiconducteur. La TIR est la technique de détection et de conversion de l'énergie de rayonnement infrarouge (IR) émise par un objet à un spectre de lumière visible [69]. Les caméras infrarouges (CIR) sont un bon exemple de cette technique. Une CIR mesure les gradients thermiques sur les surfaces et les convertit en images codées par couleur (image IR).

Les principaux avantages de la TIR par rapport aux mesures traditionnelles sont : fournir des informations thermiques sur relativement grandes zones ou surfaces plutôt que sur un seul point. Les mesures sont obtenues sans perturber la zone de mesure (pas de contact physique). Et un avantage très important pour l'étude de la stabilité dans le temps est que la TIR offre un temps de réponse très court (20 μ s [70]).

Les principaux inconvénients sont : prix relativement élevé, ne conviennent pas aux applications de hautes précisions (pour la mesure de température en valeur réelle ou absolue). Une précision moyenne d'une CIR à qualité supérieure est d'environ $\pm 2\%$, en outre, la lecture de la température réelle n'est pas directe de l'image [71]. De nombreux facteurs peuvent influencer sur la mesure, par exemple: Émissivité, réflexions thermiques des sources de chaleur environnantes réfléchies dans la caméra, effets de Narcisse (réflexion du détecteur lui-même) [72, 73], angle

de projection, etc. [69, 74]. Pour atteindre la cible de résolution maximale de 2% [75], une expérience et une formation en thermographie thermique sont requises.

Dans cet ouvrage, nous allons utiliser la TIR, pour la caractérisation thermique et les mesures des gradients thermiques sur les surfaces.

2.10 LES NIVEAUX HIÉRARCHIQUES DE GESTION THERMIQUE DANS L'ÉLECTRONIQUE.

En électronique à semiconducteur, une bonne gestion thermique doit accompagner toutes les étapes de développement et de conception, de la fonderie (procédé de fabrication d'un composant et mise en boîtier) jusqu'à le plus haut niveau d'un produit final. La figure 2.11 montre la hiérarchie schématique de transfert de chaleur à l'échelle microscopique dans un boîtier électronique, les niveaux de transfert de la chaleur, les théories d'échelle de longueur et de transfert de chaleur, et des exemples de gestions thermiques utilisées à chaque niveau hiérarchique [76, ch. 1]. Donc, nous remarquons que chaque niveau hiérarchique à ses propres théories et méthodes de modélisation et de gestions thermiques. Alors nous distinguons trois niveaux hiérarchiques :

- Niveau 1 : Conception de la puce au niveau de la jonction ou noyau du chip (semiconducteur) (exemple : choix des matériaux espacements, structure des transistors, via thermiques, etc.) ;
- Niveau 2 : L'emballage et l'interface thermique entre le noyau et le boîtier. C'est l'étape qui va déterminer la façon et l'efficacité d'évacuation de la chaleur vers l'extérieur du CI ;
- Niveau 3 : Le traitement thermique à l'extérieur du CI (radiateur, convection, etc.). Mais on ne peut pas séparer ce niveau des deux premiers, car le concepteur doit bâtir sur les caractéristiques et spécifications thermiques

du CI pour compléter son système de gestion thermique externe selon les conditions environnementales d'utilisation du produit final.

Avec cette méthodologie hiérarchique, on réduit ou parfois on élimine complètement le besoin d'une solution plus complexe et plus coûteuse à un niveau hiérarchique plus élevé. Le respect de ces 3 étapes mène à un produit final compétitif. Par exemple : plus petit, plus léger, moins coûteux, meilleure efficacité énergétique, etc.

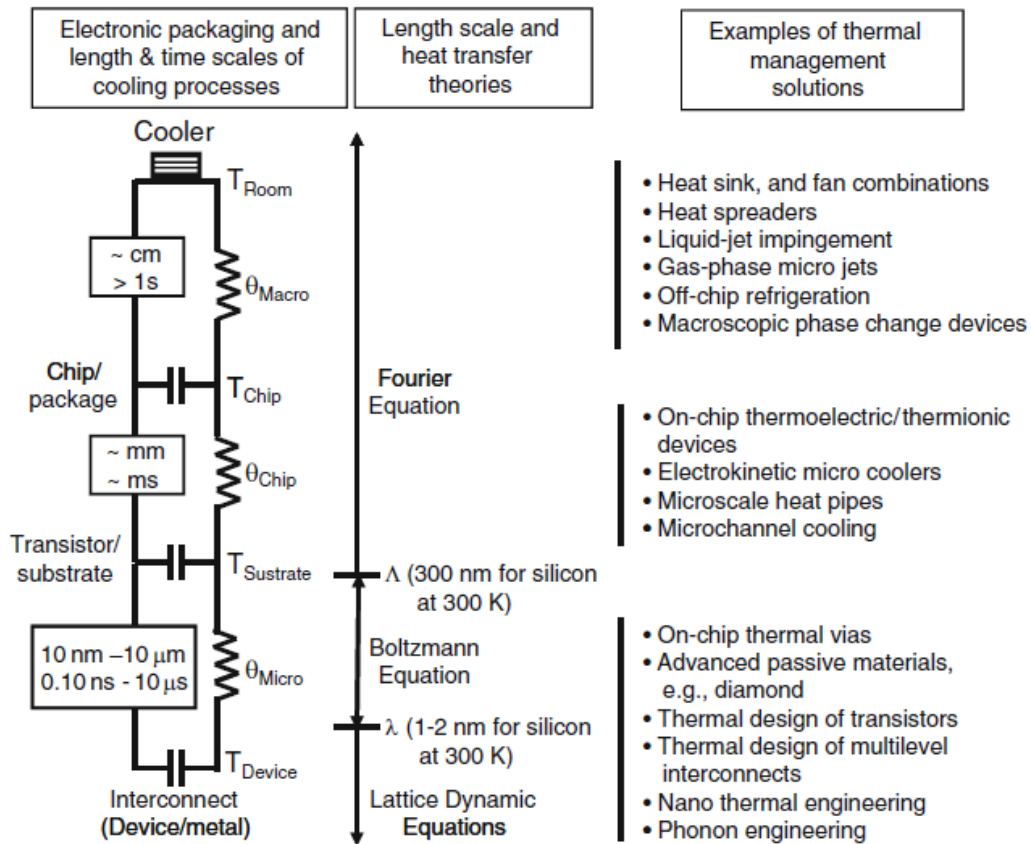


Figure 2.11. Hiérarchie schématique du transfert de chaleur à l'échelle microscopique dans un boîtier électronique [76].

Pour le reste de ce chapitre nous allons exposer l'état de l'art à chacun de ces trois niveaux. Nous allons mettre plus de l'accent sur le niveau 3 et surtout la convection forcée par jet de fluide qui est en relation directe avec notre thèse.

2.11 PROBLÈMES ET LIMITATIONS DU SEMICONDUCTEUR, ET LES TECHNOLOGIES ALTERNATIVES (NIVEAU ZÉRO)

Dans la fabrication des circuits intégrés, il existe des techniques pour réduire la dissipation en chaleur. Juste pour mentionner une, on peut réduire la résistance ohmique. Par exemple dans la conception et la fabrication des circuits CMOS, on peut ajuster plusieurs paramètres comme : augmenter le rapport de la largeur sur longueur (W/L) du canal d'un transistor FET, l'épaisseur de l'oxyde, la densité de la diffusion, etc. pour réduire sa résistance (R_{on}). Par exemple pour un nFET la résistance du canal (en mode non-saturés) pourrait être calculée comme suit [33, ch. 3 et 6] :

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (2.22)$$

Où, C_{ox} est la capacitance d'oxyde (F/cm^2) ;

t_{ox} est l'épaisseur de l'oxyde (cm) ;

$\epsilon_{ox} = 3,9\epsilon_0$ est la permittivité du silicium (F/cm) ;

$\epsilon_0 \approx 8,854187887 \times 10^{-14}$ est la permittivité du vide (F/cm) ;

$$\beta_n = \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) \quad (2.23)$$

Où, β_n est la transconductance du dispositif (A/V^2) ;

$\frac{W}{L}$ est le rapport largeur/longueur du canal ;

μ_n est la mobilité des électrons ($cm^2/V\text{-sec}$).

$$R_n = \frac{2}{\beta_n [2(V_{GSn} - V_{Th}) - V_{DSn}]} \quad (2.24)$$

Où, R_n est la résistance du canal (Ω) ;

V_{GSn} est la tension entre la grille et la source (V) ;

V_{Th} est la tension du seuil du transistor (V) ;

V_{DSn} est la tension entre le drain et la source (V).

Augmenter la largeur du transistor réduit la chaleur dissipée et augmente la performance. Mais, il y a toujours des compromis à faire, car on doit payer au niveau de l'espace et du coût de fabrication.

En général, la loi de More qui gouverne l'avancement de la technologie du semiconducteur semble atteint rapidement à sa fin. En fait, avec la réduction d'échelle du procédé de fabrication des CI, à partir de 7 nm, les transistors approchent maintenant de plus en plus vers la taille d'un atome. Dans ce cas, les électrons libres (qui conduisent le courant électrique) peuvent disparaître de manière aléatoire d'un tel composant électrique aussi minuscule (effet de quantum tunneling), ce qui rend le transistor non fiable [77, 78, ch. 3]. Mais récemment, Berkely Lab, a réussi à contourner ce problème. En effet il a réussi à construire le premier transistor fonctionnel à une échelle proche 1 nm. Pour cela, il a utilisé un nanotube au carbone creux de 1 nm de diamètre comme la grille du transistor pour contrôler le flux d'électrons (figure 2.12) [79].

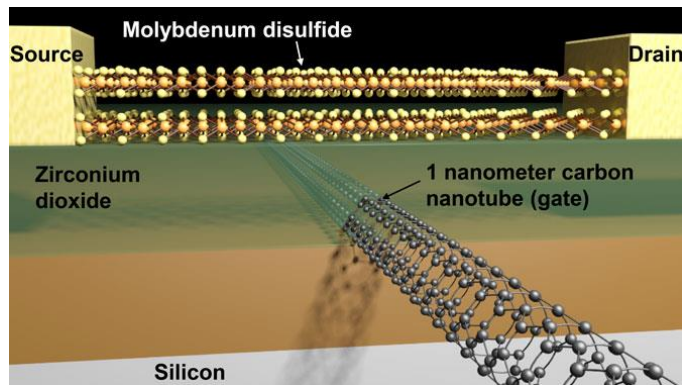


Figure 2.12. Premier transistor fonctionnel d'une grille de 1 nm [79].

Même si on a gagné à franchir cette limite, il existe d'autres problèmes incontournables. Par exemple l'augmentation de la puissance dissipée par unité de surface [80], le coût élevé de fabrication [81], et la disponibilité de la technologie à un niveau industriel. Concernant ce dernier point, la plupart des fonderies dans le monde n'ont pas la capacité nécessaire pour adapter cette technologie [82]. Notons encore que la vitesse d'horloge dans les ordinateurs a atteint un plateau autour de 4 GHz depuis quelques années. Pour compenser à cette limite, les processeurs multicœurs ont vu la lumière. On a amélioré la performance, mais le problème est que les cœurs d'un processeur doivent communiquer entre eux pour partager des tâches. Cette communication « interprocesseurs » a réduit beaucoup l'efficacité énergétique donc la puissance dissipée. En effet, cette communication est responsable de plus de 50% de la consommation totale d'énergie d'un ordinateur à processeur multicœur [77].

Alors, existent-ils des technologies alternatives ? En effet les chercheurs travaillent actuellement sur des alternatives à la technologie au semiconducteur qui domine le marché de la haute technologie depuis plus de 70 ans. Le but de ces nouvelles technologies est de contourner les limitations du semiconducteur au niveau de la performance et de l'efficacité énergétique.

2.11.1 Les super-conducteurs, pour une résistante ohmique de zéro !

Depuis plusieurs années les chercheurs cherchent des méthodes pour réduire la résistance ohmique proche d'un zéro absolu, cela marque la naissance des super-conducteurs (SC) [83]. Dans une ligne de transmission d'électricité à SC, on peut transmettre une centaine de mégawatts sur une ligne avec un diamètre d'un cheveu. En relation avec le domaine de semiconducteur, les chercheurs travaillent actuellement sur des structures hybrides superconducteurs-semiconducteurs. Par exemple la jonction Josephson, le dispositif nanométriques balistiques Majorana, et dispositif d'interférence quantique super-conducteur [84, 85, 86, 87].

La figure 2.13 montre un dispositif super-conducteur-semiconducteur couplé dans Majorana nano-wires. Le but est d'étudier l'effet d'un champ électrique induit par une tension appliquée sur une grille sur le courant d'électron dans le semiconducteur (InSb) couplé à un super-conducteur (Al). Cette étude a conclu que le champ électrique a un effet sur la force de couplage, et que des pics de conductance à polarisation nulle stable pourraient être obtenus [88]. Est-ce que cela marque le premier transistor à super-conducteur ?

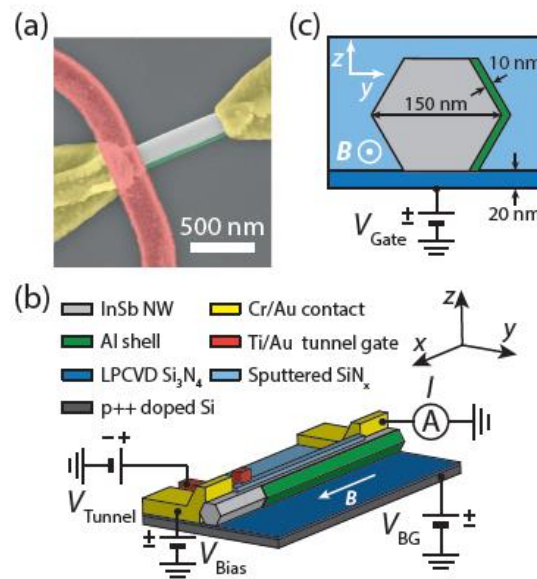


Figure 2.13. Dispositif super-conducteur-semiconducteur couplé dans un Majorana nanowire [88].

Les problèmes majeurs pour les SC sont au niveau du coût et de la faisabilité. Pour avoir les propriétés d'une SC, on doit maintenir le matériau SC à des températures extrêmement basses à moins que -75 °C (selon les caractéristiques du matériau utilisé) [89]. Ce refroidissement extrêmement bas est nécessaire pour qu'un matériau garde ces caractéristiques électriques de « super conduction ». Une solution à SC pour le problème thermique ne semble pas encore réaliste au temps actuel. Elle est encore dans la phase de la recherche et d'expérimentation.

2.11.2 La photonique et l'optoélectronique pour un meilleur rendement thermique

Dans l'informatique photonique ou encore optoélectronique (hybride photonique-semiconducteur), les informations binaires électriques seront remplacées par une information lumineuse. Une telle technologie va éliminer le problème

thermique dans les circuits électriques tout en éliminant les courants électriques dans les résistances ohmiques.

Plusieurs récentes recherches sont menées pour développer de nouveaux composants pour manipuler et contrôler la lumière [90]. L'amélioration de la performance des commutateurs optiques (transistor optique) est l'élément le plus important pour la réussite de cette technologie [91]. [92] a mené une expérience intéressante pour contrôler pour la première fois avec une grande précision un mélange des signaux optiques par des champs électriques adaptés. Ces résultats montrent presque une parfaite distinction entre les deux niveaux binaires on/off (booléen vrai/faux). Ces propriétés sont essentielles à la création d'un transistor optique pratique et fonctionnel.

Les systèmes optiques et optoélectroniques commencent déjà à établir une niche dans le marché de la technologie. Par exemple, la compagnie Ayar Labs qui a été lancée récemment par des chercheurs de « Massachusetts Institute of Technology » aux états unis a commencé à commercialiser ses produits. La figure 2.14 montre un circuit intégré photonique (CIP) avec un débit de commutation qui peut atteindre 6.4 Tb/s [93].

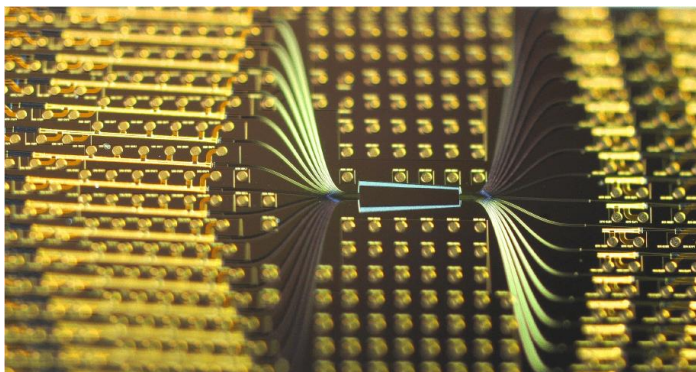


Figure 2.14. Ayar Labs SuperNova, est un PIC pour alimentation en lumière. Il génère huit ou seize longueurs d'onde de lumière en bande O, avec capabilité de

multiplexage, distribution et amplification pour un total de 256 canaux de données, soit 6,4 Tb/s [93].

Le futur semble être très promettant dans ce domaine de la technologie. Est-ce que la photonique va remplacer le semiconducteur bientôt ?

2.12 TECHNIQUE POUR CONDUIRE LA CHALEUR VERS L'EXTÉRIEUR DU CI (NIVEAU 2)

Le niveau du packaging est très important pour la gestion thermique un CI. À ce niveau, les caractéristiques thermiques de ce dernier seront établies. À la fonderie, le packaging approprié sera choisi selon les applications et les conditions d'utilisation du produit final. Les propriétés thermiques de chaque composant et de son package sont normalement bien définies dans la fiche technique spécifique.

2.12.1 Considérations thermiques dans les QFN et les autres EPP packages

Les 'Quad Flat No-leads package' (QFN) sont un type de CI de 'Surface mount technology (SMT) de la famille à petite taille à boîtier à pale exposée. La figure 2.15 montre un exemple de ce type de CI, il est spécialement conçu à petite taille pour réduire l'utilisation de l'espace. Il est très utilisé dans les applications à grande densité où la contrainte de la surface est très critique, comme les téléphones intelligents.

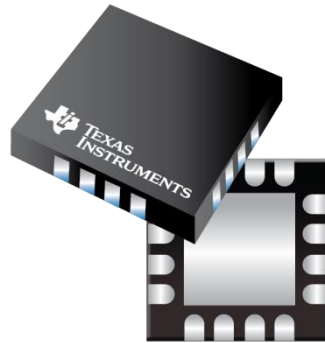


Figure 2.15. Exemple de boîtier de type 'Quad flat No Lead' de TI [94]

Dans ce type d'application, l'utilisation des radiateurs thermique sur les boîtiers des composants à puissance est impossible. D'ici vient l'idée des EPP. La figure 2.16 -a montre le transfert de chaleur dans les EPP. Le PCB sera le radiateur qui va dissiper la chaleur des composants à puissance. Donc, la majorité de la chaleur est conduite vers le PCB [40]. La figure 2.16 -b montre les détails et le mécanisme par lequel un bon transfert est achevé. La palette exposée (Exposed paddle (EP)) est un métal qui fournit un chemin de faible résistance thermique pour le transfert de chaleur au PCB. Le PCB est normalement à multicouche. Pour profiter efficacement de toutes ses surfaces, l'EP doit être attachée au plan de masse du PCB. En Plus, l'EP est soudée au 'Thermal Landing' (TL) (en cuivre). Cela va créer un chemin thermique efficace à la surface 1 du PCB. Des vias thermiques assure un chemin thermique efficace entre le TL, le plan de masse et un deuxième TL sur la surface 2 du PCB [40].

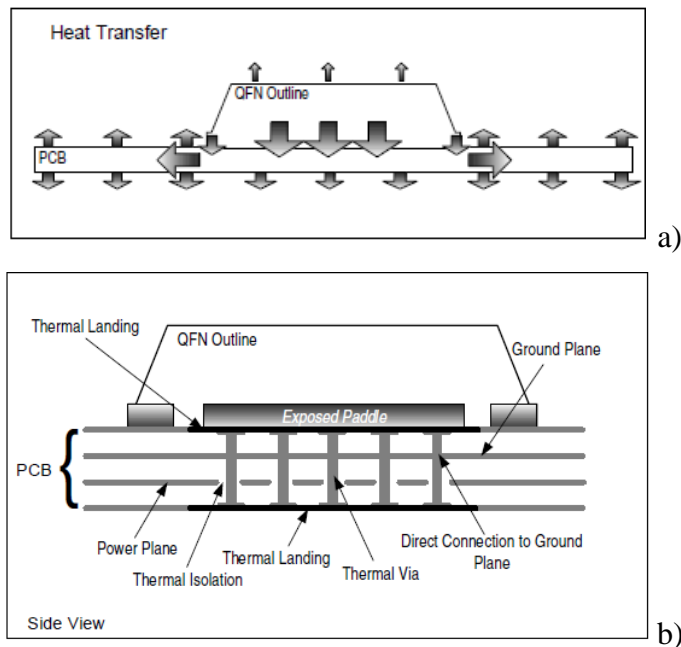


Figure 2.16. a) Transfert de chaleur dans les EPP, b) Vue latérale du PCB, EP, des biais thermiques et de 'Thermal Landing' [40].

Heureusement que ce type de packaging n'est pas utilisé pour les ASICs de la DB. La résistance thermique entre la jonction et le top du package est relativement grande. Et si la plupart de l'énergie thermique est dissipée par le PCB, il sera très difficile de refroidir et de stabiliser thermiquement les pixels PET qui sont collés directement sur le PCB.

2.12.2 Considérations thermiques dans les « Wafer Level Chip Scale Package » (WLCSP)

Le WLCSP est une technologie de packaging au niveau de la gaufre (wafer). Dans ce type de technologie, la forme finale du dispositif aura la face externe (non active) de la gaufre de Si comme package top, et sur l'autre surface, un motif des billes de soudure d'E/S compatible avec les processus traditionnels d'assemblage des

IC. La figure 2.17 montre un WLCSP typique de 3 x 3. L'avantage principal de cette technologie est au niveau de l'économie de l'espace considérable [95].

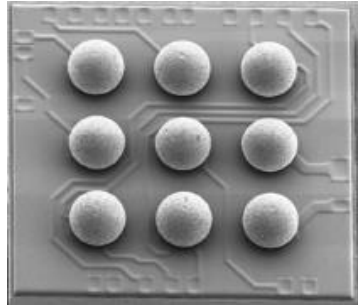


Figure 2.17. Un Micro WLCSP typique de 3x3 [96].

Au niveau de la performance thermique, plusieurs facteurs peuvent affecter la performance au niveau de la température de jonction T_j comme : la taille du dé, la dissipation de puissance du dispositif, le design de package, la température ambiante et le type de convection, et la dissipation de puissance des autres composant à proximité. Autres facteurs au niveau du PCB doivent être considéré dans l'application finale du IC comme : La densité de métal et sa distribution dans le PCB, et les vias, leurs nombres, diamètres, et l'épaisseur de leurs murs. Pour un WLCSP de 5,3 x 5,3 mm avec 120 E/S la résistance caractéristique (Junction-to-package) est estimée à $\Psi_{JT} = 3 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ [97]. Pour le même WLCSP, [98] a reporté $\theta_{JC} = 2,4 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ et $\theta_{JB} = 11 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. [95] compare les caractéristiques thermiques de plusieurs WLCSP à plusieurs tailles. Pour des WLCSP de 5 L à 64 L avec des PCB de 1S0P à 2S2P, et PD de 0,25 W à 1,25 W, θ_{JC} varie de 2,5 à 0,1 $^\circ\text{C/W}$, et θ_{JB} de 57,6 à 4,5 $^\circ\text{C/W}$. [99] a reporté une amélioration de la dissipation thermique du top du WLCSP tout en attachant un diffuseur de chaleur sur le boîtier de ce dernier.

Les ASICs de la DB sont des WLCSP avec une taille approximative de 6.4 x 5.0 mm et de 120 E/S, La DB est un PCB de 12 couches à grande densité de métal. Donc une très faible $\theta_{JC} (< 1 \text{ } ^\circ\text{C/W})$ et une faible $\theta_{JB} (< 5 \text{ } ^\circ\text{C/W})$. Mais la surface du

top de l'ASIC est relativement petite avec une pauvre convection à l'air ambiant. Contrairement à surface du PCB qui a une surface plus grande avec une grande capacité donc une convection plus efficace à l'air ambiant. Malgré une petite θ_{JC} un grand pourcentage de P_D (70 à 95%) sera dissipé par le PCB [100]. [101] a reporté une dissipation de 93% de la puissance générée dans la jonction par le PCB et juste 2% par le top. Cette dissipation a été améliorée à 11% par le top et 87% par le PCB tout en ajoutant un radiateur sur le top.

2.13 ÉTAT DE L'ART SUR QUELQUES TECHNIQUES DE REFROIDISSEMENT DANS L'ÉLECTRONIQUE MODERNE (NIVEAU 3)

Au niveau de la conception du circuit électronique (niveau 3), le choix des composants avec une bonne efficacité énergétique est une clé. Pas juste les composants, mais encore l'expertise du concepteur et sa conception efficace jouent un rôle important dans la réduction de la consommation et de la perte en chaleur de l'énergie électrique. Le concepteur doit prendre en considération la dimension thermique de son système. Mais souvent malgré une bonne conception, on n'arrive pas à éliminer à 100% le problème thermique. Dans ce cas, un système de gestion thermique externe sera nécessaire. Dans cette section nous allons introduire l'état de l'art au niveau des méthodes d'évacuation de la chaleur à partir des surfaces chaudes des composants d'électroniques de puissances.

2.13.1 Gestion thermique passive

La gestion thermique passive fait référence aux technologies de refroidissement qui utilise le principe de la thermodynamique naturelle pour le transfert de chaleur [102]. Donc, le processus de transfert de chaleur n'est pas altéré ou forcé en aucune manière par d'autres méthodes autres que la thermodynamique

naturelle. La figure 2.18 montre un exemple de gestion thermique passive par convection naturelle. Des dispositifs de convections comme les radiateurs sont utilisés pour améliorer la convection de la chaleur. Généralement, un radiateur est monté sur le boîtier d'un composant de puissance. Dans ce cas des matériaux d'interface thermique « Thermal Interface Material » (TIM) seront utilisés (entre le radiateur et la surface du boîtier) pour réduire la résistance thermique entre les deux surfaces.

(Convection naturelle)

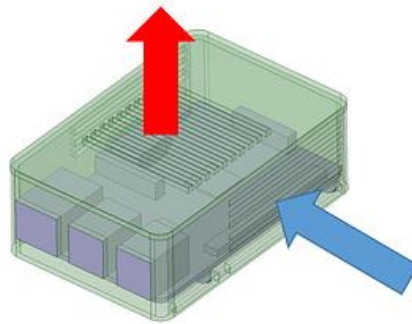


Figure 2.18. Gestion thermique passive, transfert de la chaleur entre solides et fluide par convection naturelle [103].

Ce qui suit dans cette section est quelques exemples de l'état de l'art sur des techniques et méthodes utilisés dans la gestion thermique passive.

2.13.1.1 Matériau à changement de phase

Les matériaux à changement de phase (MCP) absorbent l'énergie thermique et la déposent lors d'une transition de phase solide à liquide. Cela permet de maintenir la température près du point de fusion du MCP [104] (stabilisation passive). Des exemples des matériaux MCP sont : les paraffines et les acides gras. Les MCP utilisent la chaleur de fusion (latente) lors du passage de solide à liquide pour absorber de l'énergie et vis versa. Généralement, la capacité thermique massique des MCP est de 10 à 100 fois plus que celle des matériaux courants. Figure 2.19 montre le principe des MCP, nous remarquons qu'au point de fusion, le MCP stabilise la température jusqu'à ce que la matière rentre dans la phase liquide. Cela signifie que dans des cas particuliers, une bonne conception (choix matériau, quantité, configuration, etc.) avec un MCP peut être utilisée pour des applications de stabilisation thermique sans l'utilisation des systèmes de contrôle dynamique.

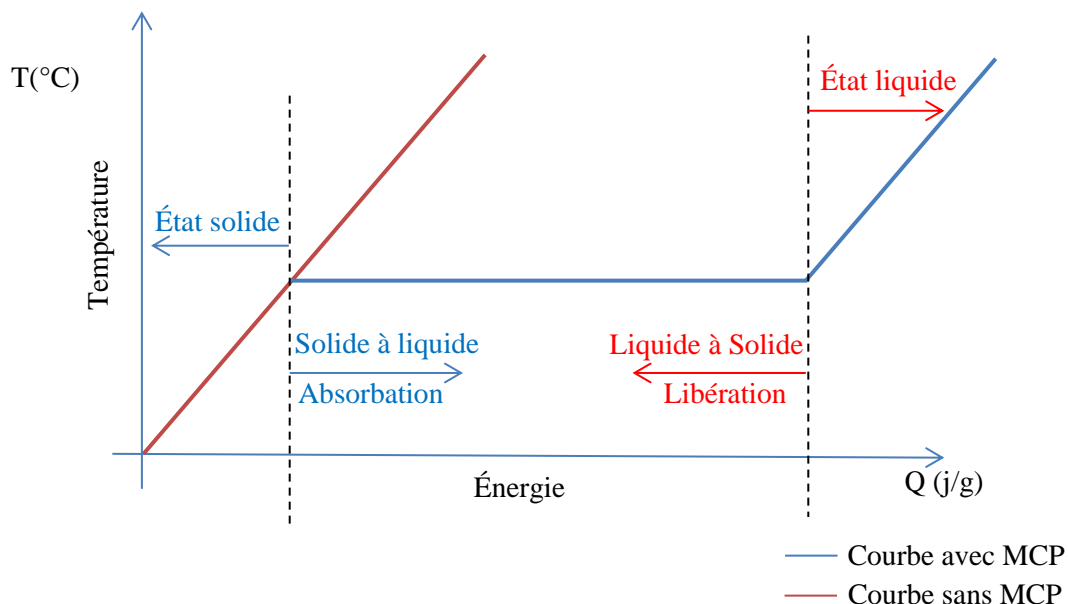


Figure 2.19. Hausse de la température en fonction de l'accumulation d'énergie dans le temps. La température est maintenue pendant la transition de phase.

La figure 2.20 montre un exemple de l'utilisation des MCP dans un radiateur

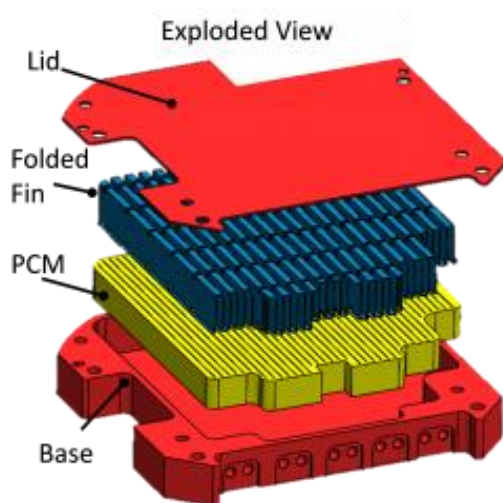


Figure 2.20. Un radiateur à MPC (Grâce à 'Advanced Cooling Technologies').

Les avantages des MCP sont : stockage de la chaleur, poids léger, refroidissement et stabilisation passifs. Et les limitations sont : Résistivité thermique relativement élevée ($> 1 \text{ mK} / \text{W}$) et coût élevé.

Tableau 2.4 liste quelques types de MCP avec leur caractéristique.

Tableau 2.4 Les types de MCP incluent les cires de paraffine, les produits organiques non paraffinés, les sels hydratés et les produits métalliques [39].

Propriété ou caractéristique	Paraffine	Matières organiques sans paraffine	Sels hydratés	Métalliques
Température de fusion	Élevé	Élevé	Élevé	Med.
Conductivité thermique	Très bas	Bas	Élevé	Très Élevé
Température de fusion (°C)	-20 à 100	5 à 120	0 à 100	150 à 800
Chaleur latente (kJ / kg)	200 à 280	90 à 250	60 à 300	25 à 100
Corrosif	Non corrosif	Légèrement corrosif	Corrosif	Varie
Économie	\$	\$\$\$ à \$\$\$\$	\$	\$\$ à \$\$\$
Cycle thermique	Stable	Une température élevée peut provoquer une décomposition	Instable sur les cycles répétés	Stable
Weight	Médium	Médium	Light	Heavy

Nous ne pouvons pas utiliser les MCP sur la structure de la DB. La petite surface de la DB et le manquement de l'espace rendent cette solution très difficile. Les MCP ont besoin d'un design personnalisé dans le manufacturier ce qui augmente radicalement le coût. Mais il est intéressant d'étudier l'application des MCP dans la stabilisation thermique dans des futurs travaux.

2.13.1.2 Le Caloduc (Heat Pipe)

Le Caloduc (Heat Pipe(HP)) est un élément passif qui utilise le principe de changement de phase entre liquide et gaz. Il est très utilisé dans les circuits électroniques modernes de puissance pour refroidir ces derniers. La figure 2.21 montre son principe de fonctionnement. Dans une structure scellée (normalement un tube) sous vide avec une petite quantité de fluide à l'intérieur contenu dans la structure de la mèche qui recouvre le diamètre intérieur.

Lorsque le composant de puissance génère de la chaleur, le fluide dans l'extrémité chaude du HP se vaporise, et par sa propre pression, elle se propage

rapidement à l'autre extrémité du HP, où elle cède sa chaleur latente (normalement à un radiateur ou autre mécanisme de refroidissement attaché au HP) et se condense en liquide dans la structure de mèche. Cette dernière pompe de manière passive le fluide vers l'évaporateur en utilisant une force capillaire. Et ce cycle de vaporisation-condensation se répète en boucle fermée d'une manière passive aussi longtemps qu'un certain différentiel de température existe entre les deux extrémités du HP.

Le HP est un composant extrêmement efficace avec une conductivité d'ordre de $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [105].

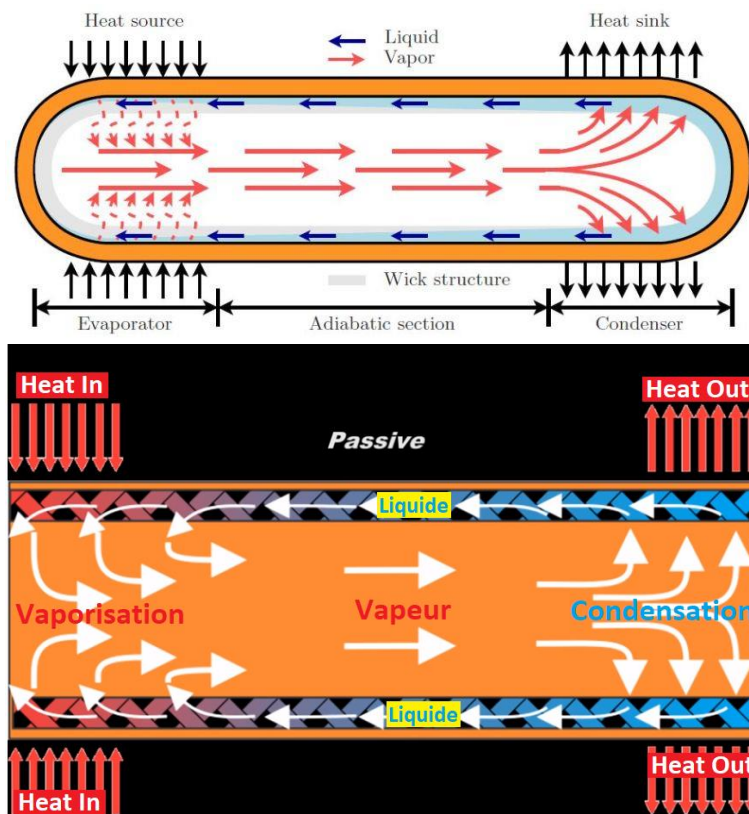


Figure 2.21. Principe de fonctionnement du HP [105, 106]

Il existe plusieurs types de HP, pour différents objectifs d'utilisations (tableau 2.5). Plusieurs facteurs peuvent affecter la performance d'un HP comme : Matériau du contenant, propriété du fluide, type de structure de mèche, variations dimensionnelles, température de la source et de la sortie (radiateur), l'orientation du HP, la puissance absorbée à la section de l'évaporateur et les nanoparticules [107].

Tableau 2.5 Liste de quelques HP, leurs objectives utilisations et conductivités

Type de HP	Utilisation
À chambre de vapeur (Plat)	Puissance et flux de chaleur élevés appliqués à un évaporateur relativement petit
À conductance variable (VCHP)	Puissance et températures variantes ou instables dans le temps
Contrôlé par pression	il a la capacité contrôlée la température dans une marge serrée.
Diode	À une conductivité thermique élevée dans un sens et une conductivité thermique faible dans le sens inverse.
Thermosiphon	Fonctionne par gravité, car le condenseur est situé au-dessus de l'évaporateur. Sensible à l'orientation, mais performance élevée.
HP tournant	Dans ce type de caloduc, une action centrifuge est utilisée pour renvoyer le fluide de travail dans l'évaporateur. Il est indépendant de la gravité, mais au prix de la performance.

Malgré son efficacité en transport de chaleur, le HP ne porte pas une solution pratique pour notre application. Dans cette dernière, nous devons refroidir plusieurs surfaces et composants de SMT de petite échelle. Ces composants sont distribués sur

deux cartes (AB et DB) qui sont séparées par un connecteur. Encore la structure de la DB n'est pas conçue pour supporter ni le poids ni la structure d'un HP.

2.13.1.3 Les “Metal Micro-Textured Thermal Interface Materials” (TIM)

L'utilisation des dispositifs pour améliorer la convection thermique sur le boîtier du composant à puissance (par exemple radiateur, heat pipe etc.) nécessite un composé comme une graisse thermique pour combler les mini espaces entre les deux surfaces en regard des deux structures pour améliorer les propriétés de transfert thermique. Mais le composé même a sa propre résistance thermique qui s'additionne à la somme des résistances déjà existante dans le chemin. [108] a introduit les Metal Micro-Textured thermal Interface Materials (MMT-TIM) qui remplace et donne un meilleur rendement que les autres méthodes traditionnelles. Le MMT-TIM ou métal micro texturé est normalement un aluminium modelé d'une manière à lui rendre hautement compressible et il sera placé entre le radiateur et le composant pour remplir les lacunes et les déformations microscopiques pour améliorer le flux thermique entre les deux surfaces.

La figure 2.22-a montre ce concept et la figure 2.22-b montre les résultats de comparaisons entre le pad en graphite et le MMT-TIM; on voit une amélioration remarquable de ce dernier dans le transfert de la chaleur entre les deux surfaces.

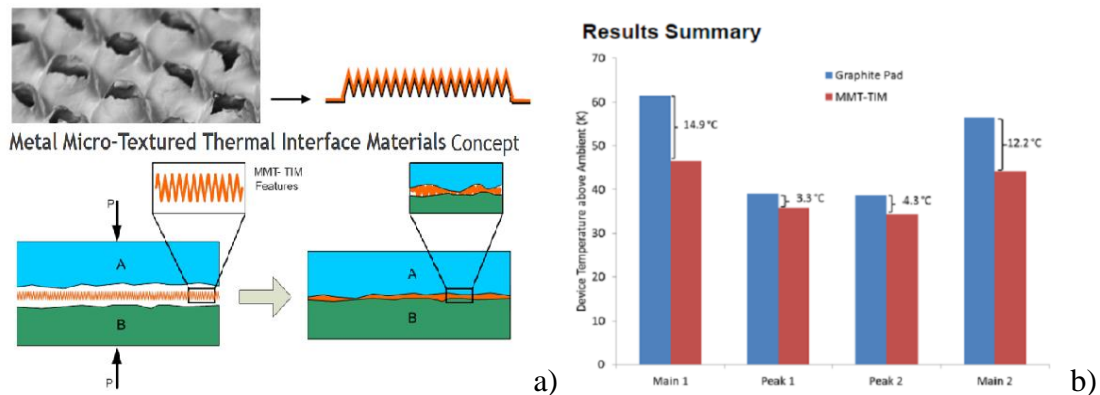


Figure 2.22. a) Le concept de MMT-TIM (Metal Micro-Textured Thermal Interface Materials); b) Résultats de comparaisons de transfert de la chaleur entre le pad en graphite et le MMT-TIM. [108]

Nous ne pouvons pas utiliser les MMT-TIM sur l'ASIC. Un radiateur ou une autre structure de refroidissement a besoin d'exercer une pression sur les MMT-TIM. La structure de la DB n'est pas conçue pour supporter une telle structure (par exemple des trous pour visser le radiateur en place).

2.13.1.4 Autre interface médiane thermique

Ziitek Electronic TechnologyTM [109] offre une gamme de matériaux d'interfaces thermiques, par exemple la colle d'époxy thermique qui a une bonne conductivité de [2,5 W/m-K] (figure 2.23 -a), ou le ruban adhésif thermique avec [0,9 W/m-K] (figure 2.23 -b), etc. Ces matériaux sont nécessaires pour améliorer la conductivité thermique entre la structure du composant génératrice de la chaleur et la structure du dissipateur, par exemple un HP.

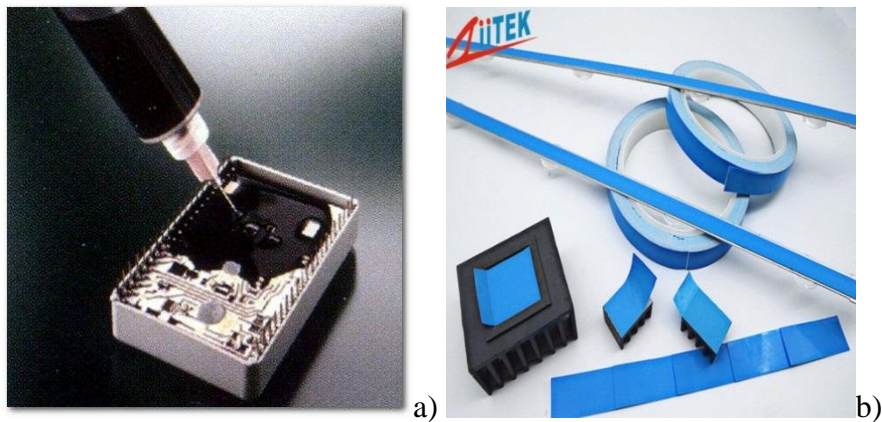


Figure 2.23. a) époxy adhésif thermique; b) ruban adhésif thermique.

Nous allons servir des époxy et des rubans thermiques dans nos expérimentations sur les DB et les ASICS. Le ruban est notamment idéal pour nos expérimentations. Il est propre, facile à appliquer et à enlever sans endommager les surfaces.

2.13.2 Gestion thermique active

La gestion thermique est dite active ou forcée lorsque de l'énergie est utilisée pour augmenter le processus de transfert de chaleur. Exemples de gestions thermiques actives sont : une pompe de fluide ou un ventilateur à air installé sur un radiateur. Les principaux avantages de la méthode active sur la passive sont : l'augmentation du débit de fluide pendant la convection, ce qui augmente considérablement le taux de transfert de la chaleur, et la possibilité d'introduire la notion du contrôle pour des applications de stabilisations thermiques. Leurs inconvénients principaux sont : besoins d'énergies pour fonctionner (électricité ou autres), introduction possible de bruit audible et coût plus élevé [102]. La figure 2.24 montre l'ajout d'un ventilateur à un système passif (celui de la figure 2.18).

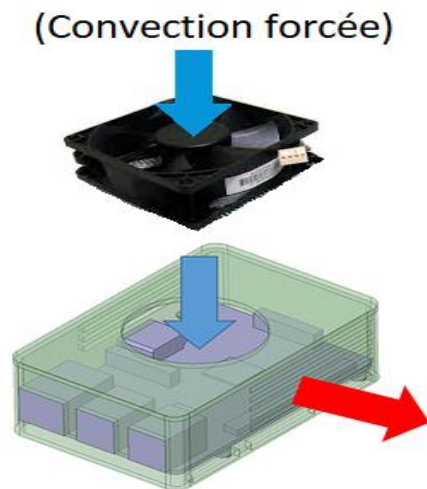


Figure 2.24. Exemple d'un système de refroidissement actif [103].

Ce qui suit dans cette section est quelques exemples de l'état de l'art sur des techniques et méthodes utilisés dans la gestion thermique active.

2.13.2.1 Refroidisseurs à plaques froides (une seule phase)

C'est une méthode efficace pour le refroidissement et la stabilisation thermique, car elle utilise un liquide comme média d'échange thermique à boucle fermée, et les liquides en général ont un bon coefficient de transfert de chaleur. La figure 2.25 montre un système industriel de BV Thermal Systems, pour contrôler la température d'une surface de +5 °C à +27 °C avec une résolution de stabilité de juste $\pm 0,1$ °C. Un contrôleur PI est intégré pour le contrôle précis de la température [110].

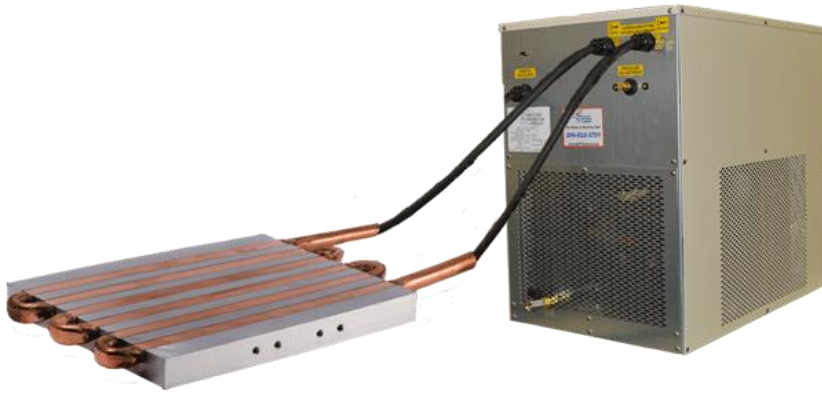


Figure 2.25. Système de stabilisation thermique 'Cool Plate Cooling Chillers' de BV Thermal Systems [110].

Tous systèmes à liquides en général offrent une solution efficace aux problèmes de refroidissement et de stabilisation thermiques. Les inconvénients par rapport aux systèmes à l'air, sont : le prix élevé, la complexité d'intégration aux systèmes électroniques, et la maintenance par la suite. Il ne faut pas aller directement vers une solution à liquide à moins qu'elle ne soit justifiée et/ou vraiment comme dernier recours.

Un système de refroidissement combiné (partie liquide et l'autre à air) est retenu pour notre projet. Un système à plaques froides sera utilisé pour stabiliser la température de la cavité du scanner LabPET II (tout autour du cylindre des RB), par la suite un CAI (dans la cavité froide) va distribuer l'air froid et stabilisé aux DB.

2.13.2.2 Nanofluide pour meilleur échange thermique

Il existe plusieurs types de liquides pour systèmes de refroidissement à liquide et qui offre une grande gamme des spécifications et de caractéristiques d'échange thermique et des conditions et méthodes d'utilisation diverses. Mais les chercheurs travaillent toujours à améliorer encore ces caractéristiques. [111] à présenter

le AL_2O_3 nano fluide qui sera mélangé avec de l'eau pour améliorer le coefficient d'échange thermique de ce dernier. Les nanoparticules utilisées ont un diamètre d'autour 30 nm avec différentes concentrations volumiques entre 0,3 et 2% dans un échangeur de chaleur à tubes avec un écoulement turbulent. Les résultats montrent une amélioration dans le coefficient de transfert de la chaleur. Mais l'augmentation de la concentration volumique des nanoparticules a causé une augmentation de la viscosité dans ce dernier conduisant à une augmentation du facteur de friction.

2.13.2.3 Refroidissement à deux phases pompées

Le refroidissement à deux phases pompées « Pumped two phase » (P2P) est basé sur la technique de condensation et de vaporisation d'un gaz réfrigérant comme le R134A. La méthode à P2P a plusieurs avantages sur la méthode de refroidissement à plaques froides comme : elle offre un refroidissement deux fois plus efficace (énergétiquement plus efficace) , elle élimine le risque de court-circuit dans le cas de fuite de liquide, et elle est plus compacte et légère [112].

2.13.2.4 Refroidissement par la méthode d'impact de jets d'air

Dans cette section, nous allons représenter plusieurs exemples qui montrent le refroidissement par la méthode de jet d'impact. Cette méthode peut impliquer un seul jet, plusieurs jets, ou des réseaux de jets (selon la grandeur de la surface et le résultat souhaiter) dirigés vers la surface à refroidir par exemple des composants électroniques sur un PCB [52, ch.6].

2.13.2.4.1 L'impact d'air multijets sur une surface plane

[47] a effectué une étude par simulation par 'computational fluid dynamics (CFD)' avec (ANSYS ICEM CFD mesher et CFX solver), sur les caractéristiques de l'écoulement de fluide et de transfert de chaleur d'un réseau de jets d'air multiples (ouvertures circulaires 3x3) sur une surface plane (figure 2.26). La surface était

chauffée uniformément. Quatre modèles CFD turbulents [113] ont été utilisés pour comparer le pourcentage de l'erreur sur les résultats de simulation aux résultats expérimentaux (tableau 2.6). Le modèle SST a donné la plus petite erreur (2.1%) avec un temps de simulation de 4,3 heures, et le pire était de $k-\epsilon$ avec une erreur de 22% et un temps de simulation de 4,52 heures. Le choix du modèle CFD est très important pour que les résultats des simulations soient valides. Il existe un grand nombre de modèles de simulation CFD, pour choisir le bon modèle, il est essentiel de comprendre ses forces, ses faiblesses et ses définitions [114].

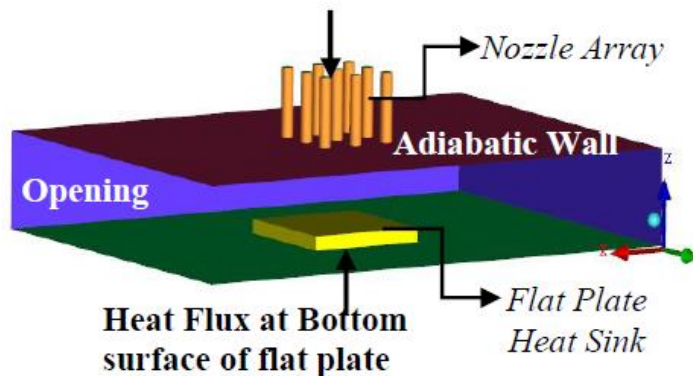


Figure 2.26. Configuration de la simulation du modèle thermique [47].

Tableau 2.6 Comparaison de plusieurs modèles de turbulence CFD utilisés pour résoudre des problèmes de jet d'impact [47].

Turbulence Model	Computational Cost (Time in hrs.)	Nu prediction error
$k-\epsilon$	High (4.52)	Poor: Error 22%
RNG $k-\epsilon$	Low (3.98)	Poor: Error 18.1%
$k-\omega$	Moderate (4.2)	Good: Error 10%
SST	Moderate (4.3)	Excellent: Error 2.1%

Encore [47] a montré la répartition de la température sur la section transversale moyenne du dissipateur thermique avec les rapports Z/d de 6, 8 et 10 et Re de 7000 à 11000. Figure 2.27 montre les résultats de cette simulation et nous constatons qu'avec l'augmentation de Re , la surface devient plus froide. Les zones situées directement sous les buses présentent les zones de températures les plus basses. Et que le rapport Z/d affecte la distribution de la température (l'homogénéité augmente avec un plus grand Z/d).

Comparé au choc à jet unique, dans le conflit à jet multiple, une distribution de température plus uniforme est observée à toutes les plages de rapport Re et Z/d .

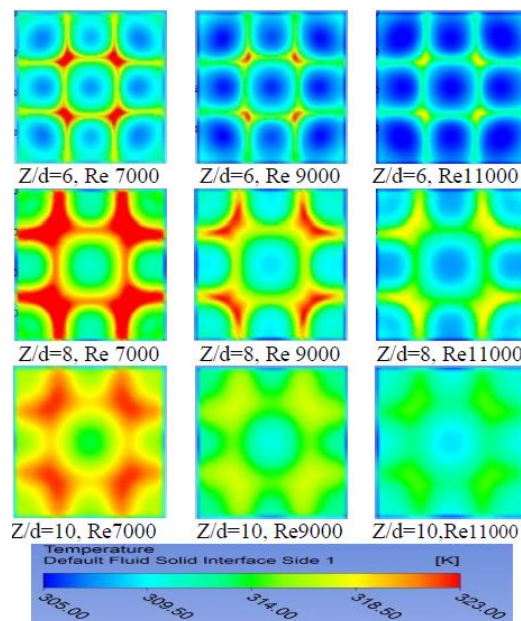


Figure 2.27. Répartition de la température sur la section transversale moyenne du dissipateur thermique avec les rapports Z/d de 6, 8 et 10 et Re de 7000 à 11000 [47].

2.13.2.4.2 Solution de refroidissement par impact direct à jets multiples basés sur des polymères à haute efficacité pour les composants à haute puissance

[115] montre une méthode pour refroidir directement le dé à semiconducteur de puissance. Pour cela, le boîtier est structuré pour permettre au fluide refroidissant de rentrer et sortir pour refroidir directement la surface du dé (figure 2.28). La méthode utilisée est à liquide par impact multijets en polymère tridimensionnel à haute efficacité basé sur des techniques de fabrication rentables pour l'électronique de puissance. Il utilise un réseau de buses 4×4 qui montre une bonne performance thermique avec une faible puissance de pompage (coefficients de transfert de chaleur jusqu'à $6,25 \times 10^4 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ avec une puissance de pompe aussi basse que 0,3 W).

B. Polymer based Multi-jets Cooling Concept

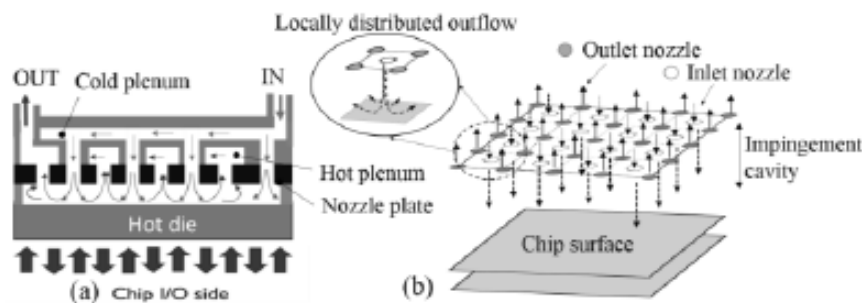
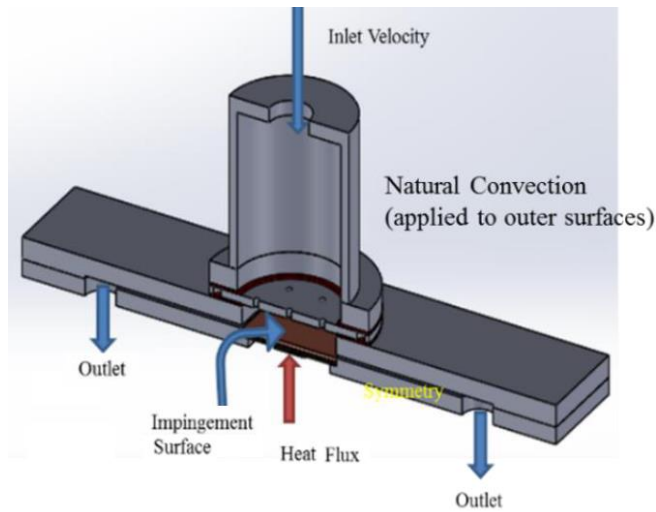


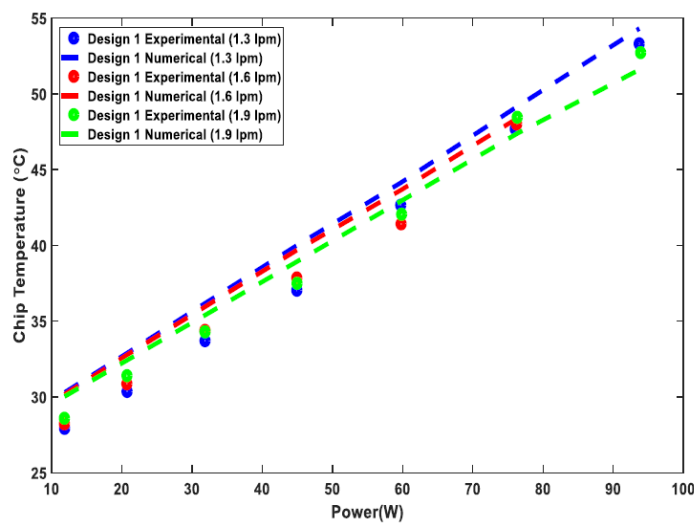
Figure 2.28. Concept du refroidisseur de polymère en forme de 3D: a) section transversale de la structure interne du refroidisseur à jets multiples; b) vue de côté des entrées et sorties réparties dans la plaque à buses [115].

2.13.2.4.3 Intégration du refroidissement par impact de jet avec des substrats de cuivre liés directement pour la gestion thermique de l'électronique de puissance

[116] montre encore une solution pour refroidir le semiconducteur, il utilise l'eau comme fluide. Il compare des résultats expérimentaux aux résultats par simulation. Pour les simulations, il utilise ANSYS ICEM CFTTM et Fluent [113]. La figure 2.29 montre le montage de simulation et les courbes de résultats expérimentaux et de simulations. Les résultats montrent que la résistance thermique est situait entre $0,21^\circ\text{C}/\text{W}$ et $0,47^\circ\text{C}/\text{W}$ pour une dissipation de chaleur de $100 \text{ W}/\text{cm}^2$



a)



b)

Figure 2.29. a) Montre la coupe transversale de la structure, b) les résultats expérimentaux.

2.13.2.4.4 Refroidissement par jet d'impact unique et direct d'un module électronique de MOSFET de puissance

[117] Montre une méthode par expérimentation et simulation (ANSYS Fluent) pour refroidir un MOSFET de puissance en remplaçant le radiateur sur le boîtier par une chambre de refroidissement à liquide (eau) avec un micro jet unique

par impact au centre et deux sortie du liquide de chaque côté. La figure 2.30 montre la mise en place de l'expérience.

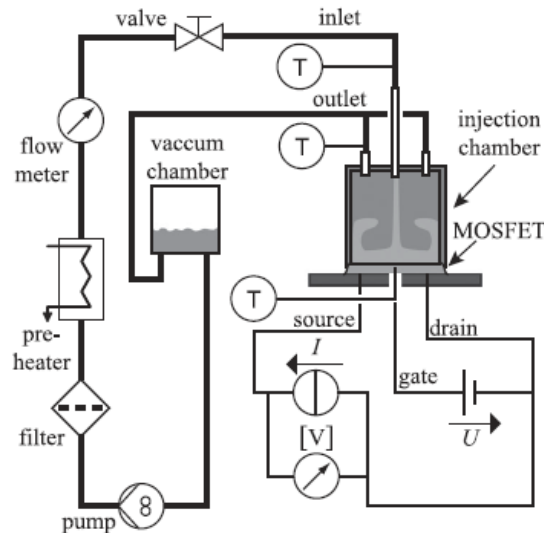


Figure 2.30. Schéma du circuit de refroidissement, de la mesure et de la configuration électrique [117].

L'objectif est de garder la température de la jonction à moins de T_{JMAX} . L'expérience montre qu'on peut dissiper une puissance de 51 W avec un débit de liquide de refroidissement de 30 ml/min avec une température de 22,5°C, tout en gardant $T_J = 163^\circ\text{C}$. Les coefficients de transfert de chaleur atteignant 12000 W/m²-K. Le dispositif (boîtier) de refroidissement occupait seulement 10,8 cm³ d'espace. Si une isolation électrique était utilisée, le coefficient de transfert de chaleur baisse presque la moitié (6000 W/m²-K).

2.13.2.4.5 Étude numérique du transport thermique dans les impacts de jets simples et multiples confinés à travers des canaux à section transversale non uniforme remplis de matériaux poreux

[118] Compare les résultats de transport thermique des impacts de jet simples et multiples confinés dans des canaux à section transversale non uniforme remplis de matériaux poreux (mousse métallique). Le but d'utilisation des matériaux poreux est pour augmenter la surface. Le substrat poreux fournit une très grande surface pour un volume donné qui est un paramètre clé dans le processus de transfert de chaleur. La base du canal non uniforme rempli de matières poreuses sera en contact avec les dispositifs à refroidir (pour augmenter le flux de chaleur). Il a comparé 11 différentes configurations. La figure 2.31 présente un radiateur à matériaux poreux installé sur un dispositif de puissance.

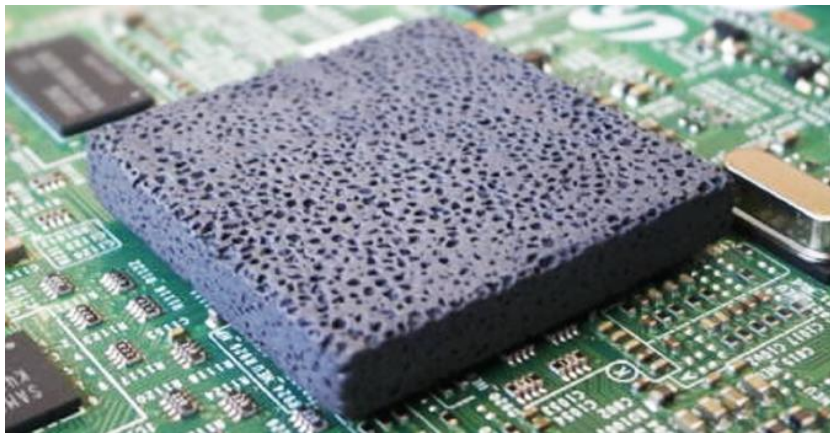


Figure 2.31. Un radiateur à matériaux poreux installé sur un dispositif de puissance pour dissiper la chaleur de ce dernier [119].

Une méthode de refroidissement qui utilise des matériaux poreux avec une convection forcée à impacts de jet est très intéressante. Mais en pratique, notre préoccupation est dans la performance à long terme. L'accumulation de la poussière sur la surface et dans les cavités des matériaux poreux va certainement dégrader les

performances thermiques avec le temps. Encore dans LabPET II nous cherchons à augmenter la capacitance thermique sur la surface pour des raisons de stabilisations thermiques.

2.14 REFROIDISSEMENT ET STABILISATION THERMIQUE DANS LES TEP-PDA

[120, 121] parlent de la conception et de la performance d'un scanner TEP-PDA clinique avec une résolution 1mm^3 . Ils parlent de l'importance de la stabilité thermique dans les PDA durant toute la période d'acquisition de données (détection). Ils utilisent un refroidissement d'eau à boucle fermée qui est couplé à des éléments thermoélectriques de Peltier pour garder la température des détecteurs stable à $18^\circ\text{C} \pm 0.05^\circ\text{C}$. (figure 2.32)

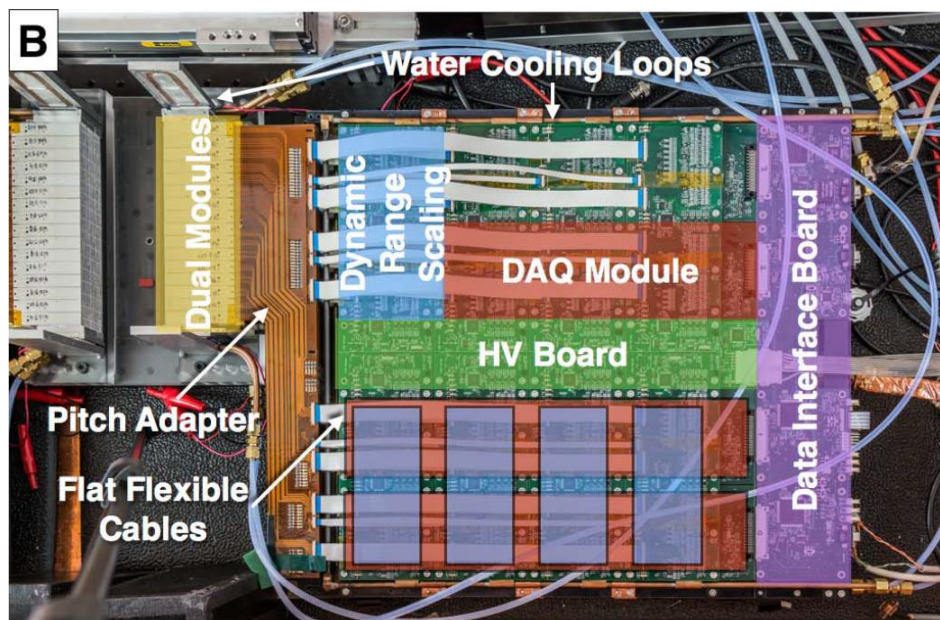


Figure 2.32 Refroidissement d'eau à boucle fermée d'un TEP-PDA [120].

[122] a étudié l'influence de la température sur la performance des détecteurs TEP-PDA. Il a testé ces derniers sur une gamme de température allant de

5° C jusqu'à 40° C. Il a utilisé des techniques basées sur l'histogramme d'inondation et la résolution temporelle des coïncidences. Il a obtenu une estimation de la tension de polarisation optimale avec un gain similaire à toutes les températures.

Dans LabPET II nous cherchons à éviter de conduire l'eau à l'intérieur du scanner. Et nous cherchons à stabiliser nos détecteurs à autour de 32° C $\pm 2\%$ idéalement avec une solution qui utilise une convection forcée à l'air. Donc l'importance est la stabilité de la température durant toute la période d'une détection plutôt que l'homogénéité de la température sur tous les détecteurs.

2.15 MÉTHODES DE CARACTÉRISATION THERMIQUE DANS L'ÉLECTRONIQUE

[123] traite le problème de source de chaleur multiple en mode transitoire. Il néglige plusieurs facteurs et il fait des hypothèses (assumptions) pour réduire le modèle thermique à une approximation linéaire (probablement à un équivalent à une superposition dans un circuit électrique). Il propose pour que son travail soit une extension au standard JEDEC qui traite une seule source. [124] effectue une étude similaire, mais sur plusieurs sources de chaleur sur le même composant tout en utilisant la thermo réflectance.

[125] utilise la thermographie IR et un modèle à éléments finis 3D pour la caractérisation thermique de boîtiers des IC en régime permanent avec une convection naturelle basé sur les spécifications JEDEC. Il utilise de la peinture thermique sur la surface et il montre sa technique d'ajustement de l'émissivité. Il monte sa méthode et ces résultats de mesure de plusieurs paramètres thermiques sur le IC (selon JEDEC).

Nos raisonnements et méthodes sont distincts et différents dans cette thèse (dans chapitre 3) que celles proposées ci-haut dans cette section. Nos objectifs ne sont

pas tout à fait les mêmes. Nous effectuons nos caractérisations dans un environnement d'application réel. Notre point d'intérêt principal est la stabilisation thermique des détecteurs (sur face 2 de la DB) plutôt que le refroidissement de la jonction d'un CI.

CHAPITRE 3

CARACTÉRISATION THERMIQUE

DE LA DB

3.1 INTRODUCTION

Le standard de refroidissement et de stabilisation thermique dans les TEPs utilise des méthodes de refroidissement à liquide. Ces méthodes sont efficaces, mais elles sont coûteuses, difficiles à implémenter, et compliquent la tâche de maintenance dans les scanners TEPs préclinique comme le LabPET II. Il y a encore toujours le risque de fuite de fluide avec tous les risques y associées. Alors la question qu'on pose ici : est-ce qu'une méthode à convection forcée d'air sera suffisante pour remplir toutes les exigences du cahier de charge du scanner LabPET II ?

Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques thermiques de la carte de détection « Detector Board » (DB). Nous avons effectué plusieurs mesures thermiques avec des thermocouples et une caméra IR. Par la suite, nous avons extrait nos résultats sur des NCSs tout en utilisant nos techniques d'analyse novatrices basées sur des mesures par thermographie IR et des analyses spatiales de traitement d'images thermiques. La grandeur de ces caractéristiques thermiques (comme la résistance thermique caractéristique) nous ait permis d'estimer avec assez de précision si une méthode de convection forcée à l'air est suffisante pour atteindre notre objectif de refroidissent.

3.1.1 Le modèle thermique de la DB

La figure 3.1 montre le modèle thermique simplifié de la DB. Ce modèle thermique est basé sur le guide de modèle thermique compact DELPHI de JEDEC (JESD15-4) [126], où : P_D désigne la puissance dissipée pour chacun des deux ASICs, T_x est la température à chaque nœud, et θ_{xy} est la résistance thermique entre deux nœuds adjacents. Les coordonnées cartésiennes en 3D de la figure 3.1-a et -c sont appliquées comme indiqué sur la figure pour identifier les trois plans de la DB (auxquels il sera fait référence dans les sections qui suivent de ce chapitre et du chapitre 4). Dans le modèle (figure 3.1-b), θ_{B2A} remplace la structure du détecteur

(cristaux et PDAs), car cette dernière a été démontée pour avoir l'accès à la DB-face 2 (comme le montre la figure 3.1-a). Nous avons besoin que la DB-face 2 soit clairement exposée. Ceci nous a permis de prélever nos mesures thermographiques de cette surface avec la caméra IR.

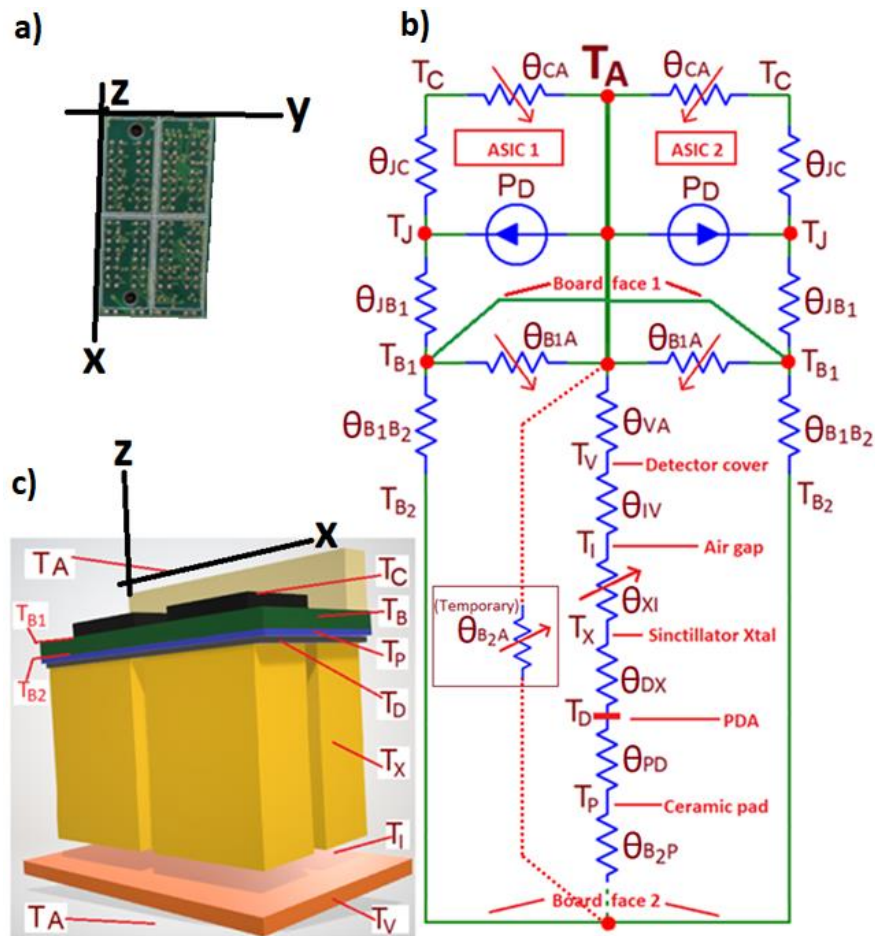


Figure 3.1. Le modèle thermique de la DB. a) et c) Représentation visuelle du plan cartésien et du placement physique des éléments thermiques du modèle. b) Le circuit du modèle thermique.

3.1.2 Défis et motivation

Dans le modèle thermique de la DB (figure 3.1), la seule variable qui est connue est la puissance dissipée $P_D = 550$ mW de chaque ASIC. Normalement, pour résoudre ce modèle thermique, nous avons besoin de connaître la grandeur de quelques autres variables, comme les différentes résistances thermiques autour des sources des chaleurs, la température de jonction ...etc. Chaque ASIC est muni d'un capteur de température à ligne de délai au niveau de sa jonction pour mesurer la température de cette dernière. Mais durant nos mesures nous avons pris compte que la lecture de ces capteurs n'est pas fiable, car ces derniers n'ont pas été calibrés, et qu'un décalage de température non négligeable existe sur leurs réponses.

Encore, le problème thermique présenté dans ce chapitre diffère d'un problème thermique classique en électronique. Car normalement en électronique, l'accent est mis sur la température de jonctions. Dans la plupart des cas classiques, on cherche à refroidir la jonction d'un composant de puissance pour protéger ce dernier d'une surchauffe excessive. Dans notre cas, pas juste la température de jonction qui nous concerne, mais surtout la température de la DB-face 2, car les pixels TEP sont installés directement sur cette surface. Et que nous devons assurer le refroidissement et la stabilité thermique de cette surface. Comme la figure 3.1-b montre, il existe une résistance thermique entre la DB-face 2 et les PDA. Donc selon ce modèle thermique, nous attendons à ce que la température des PDA (T_D) soit légèrement plus basse que la T_{B2} . Alors tout en effectuant nos mesures de pires cas thermiques sur la DB-face 2, nous assurons que les conditions thermiques sur les PDA vont être très bien respectées.

La DB est un PCB de 12 couches, la densité de métal et sa distribution dans le volume de la carte est assez complexe. Contrairement à un problème thermique avec un volume homogène, la résistance thermique spatiale est dépendante de

l'emplacement des sources de chaleur sur la surface de la carte. Si par exemple nous avons une seule source sur la carte et que nous changeons l'emplacement de cette source sur le périmètre d'un cercle par rapport à son centre. Les flux thermiques peuvent prendre différents chemins pour atteindre ce point de référence. Donc la résistance thermique est dépendante de la somme des conductivités (chemins) thermique entre la source et le point de référence. Comme nous allons voir dans les prochaines sections de ce chapitre, nous avons exploité jusqu'à un certain degré cette particularité pour extraire des motifs ou des caractéristiques thermiques de la DB.

3.2 MATÉRIELS ET MATÉRIAUX

Ce qui suit est une liste de matériels et de matériaux utilisés dans cette expérience :

- 1- Une caméra infrarouge à ondes longues (gamme spectrale 7.5 à 14 μm), Jenoptik VarioCAM® HiRes [127] (InfraTec GmbH, Infrarotsensorik und Messtechnik, Gostritzer Str. 61 – 63, 01217 Dresden GERMANY), résolution thermique 0.05K, précision de mesure $\pm 2\%$ (0 to 100 °C). Elle est utilisée dans presque toutes les mesures de température de surface (utilisé dans toutes les sections où il est spécifié). Les images IR sont représentées dans des coordonnées spatiales discrètes où chaque pixel de l'image désigne un emplacement de mesure de la température. (x,y) . L'émissivité ε de la caméra infrarouge est ajusté une fois que la température aura atteint le plateau d'équilibre maximal ;
- 2- Des logiciels informatiques numériques, "Numerical Computing Softwares" (NCS), IRT Analyzer 7™ [128] (GRAYESS Inc. 1903 60 th Place, Bradenton, FL, USA), Excel™ (Microsoft Corporation, One Microsoft Way, Redmond, WA 98052-6399, USA), LabVIEW™ (National Instruments Corporation, 11500 N Mopac Expwy, Austin, TX 78759-3504, USA) et MATLAB™ (1 Apple Hill Drive,

Natick, MA 01760-2098, USA). Ils servent à l'acquisition, le traitement et l'analyse des données (utilisés dans toutes les sections où cela est spécifié) ;

- 3- 5sc-tt-t-40-36 (OMEGA Engineering Inc. CT, USA), des thermocouples de type T de AGW taille 40, conforme aux normes JEDEC pour la caractérisation thermique des composants électroniques. Ils servent à étalonner l'émissivité ε de la caméra infrarouge et pour la mesure générale de température (utilisé dans toutes les sections où il sera spécifié). Toutes les mesures de thermocouple sont moyennées dans le temps (time averaged) pour 100 valeurs avec un temps d'échantillonnage = 0,2 s. C'est une étape nécessaire pour réduire les bruits de haute fréquence pendant la mesure ;
- 4- LM35CA (Texas Instruments, TX, USA). C'est un capteur de température à sortie linéaire avec une précision de 0,5 °C à 25 °C. Il est utilisé pour la compensation de jonction froide (cold-junction compensation) des thermocouples. Cette compensation permet de faire des mesures de température plus précises avec les thermocouples. Il est utilisé dans toutes les sections où une mesure de thermocouple est requise (le cas échéant) ;
- 5- Iwata Airbrush Silver Jet Compressor Ac-27 Is50 (Anest Iwata-Medea inc., OR, USA), pour des applications de peinture thermique précises. Elle est utilisée en conjonction avec le Medea Black Onyx NAT 124 qui est une peinture non toxique hydrosoluble. Cette peinture est pulvérisée au besoin sur des surfaces en tant que peinture thermique à haute émissivité. La peinture est nécessaire pour éliminer les artefacts thermiques et pour fournir un masque à une ε élevée pour un traitement et une mesure d'image IR de qualité. Par défaut, toutes les surfaces mesurées avec la caméra infrarouge sont recouvertes de cette peinture, sauf indication contraire ;

- 6- Un petit four à isolation thermique, d'une capacité de génération de chaleur allant de zéro à 10 watts. Le four a une ouverture supérieure spécialement conçue et dimensionnée pour s'adapter à une DB afin de chauffer uniformément (avec un air de convection chaud contrôlé à l'intérieur du four) une surface du PCB et de laisser l'autre surface exposée à l'air de convection ambiant. Ce four est conçu de manière à chauffer uniformément toute la surface du PCB ;
- 7- TIMs: adhésif conducteur / époxy CW2400, et 3M 3/4-5-8810 0.6 W/m.K, ruban adhésif thermique en polymère acrylique. Grâce à leurs conductivités thermiques élevées, ils servent à lier des dissipateurs de chaleur au boîtier des ASICs ou pour coller les thermocouples aux diverses surfaces selon nos besoins de mesures ;
- 8- Une DB régulière et une seconde sans composant (DBN). Cette dernière est juste utilisée pour le prélèvement des mesures thermiques passives, soit dans le four (pour calculer la résistance thermique caractéristique entre la DB-face 1 et la DB-face 2, et pour déterminer pour déterminer l'émissivité de la peinture thermique), ou avec les MOSFETs (qui remplacent les ASICs en tant que sources de chaleur) ;
- 8- Le NDD02N60Z-1G, qui est un transistor MOSFET de puissance utilisé comme source de chaleur contrôlable pour générer une température précise sur la DB (remplace les ASICs). Également, il permet d'ajuster avec une grande précision P_D sur la DB ce qui n'est pas possible avec un ASIC. En particulier, ce MOSFET a été soigneusement sélectionné pour correspondre à la taille de l'ASIC de la DB. En outre, nous l'avons testé pour avoir une résistance thermique θ_{JC} de $2.2^\circ\text{C}/\text{W}$ qui est en accord avec celles de l'ASIC (θ_{JB} d'autour de $2.2^\circ\text{C}/\text{W}$). Pour une $P_D = 550$ mW, nos mesures ont montré que ce MOSFET produit des niveaux de température sur la DB-face 1 et 2 qui sont en accord avec celles produites par l'ASIC. θ_{JB} de l'ASIC n'était pas donné, mais nous l'avons estimé en étudiant la structure physique de l'ASIC et les données de plusieurs fabricants de IC de la même

famille [95, 96, 97, 98, 99]. Ces MOSFETs de puissance sont nécessaires pour exécuter plusieurs analyses thermiques dans ce chapitre ;

- 9- Un module de test LabPET II (LTM) (figure 3.2) est utilisé pour alimenter une RB. Une RB peut accommoder jusqu'à 12 paires d'ABs et de DBs. Le LTM est nécessaire pour alimenter en tension et surveiller le bon fonctionnement du matériel de LabPET II. Le LTM sera connecté à un PC sur lequel un logiciel de contrôle et de surveillance est exécuté. Pour nos mesures une ou plusieurs DB sont montés selon nos besoins de mesure. Dans le texte il se peut que nous utilisions le terme RB (Radial Bord) pour référer à un LTM, car le LTM n'est qu'un ajout sur un RB du scanner LabPET II. Le but principal d'un LTM est de faciliter le prélèvement des mesures hors scanner (sur une partie du scanner) en tant que tel, il ne fait pas partie du scanner LabPET II.

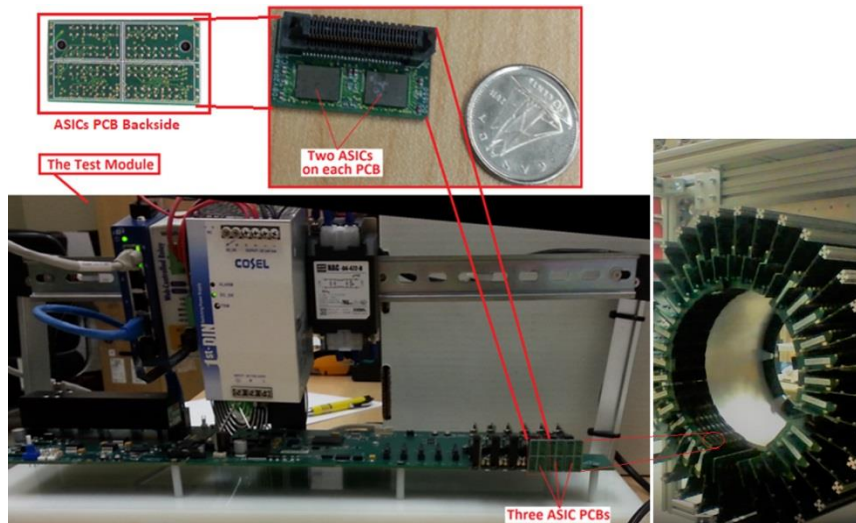


Figure 3.2. LTM avec trois DBs installées.

3.3 MESURE ET QUANTIFICATION DE LA PUISSANCE ÉQUIVALENTE P_E

Dans cette expérience nous allons mesurer T_J en fonction de la puissance dissipée équivalente P_e particulière à la DB. Nous allons utiliser les résultats de cette expérience dans des prochaines sections de ce chapitre pour estimer la résistance thermique caractéristique discrète spatiale $\Psi(x, y)$ et la puissance équivalente discrète $P_e(x, y)$ de la DB.

3.3.1 Méthode

Nous avons nettoyé une DBN avec de l'alcool isopropylique et utilisé l'époxy conducteur pour attacher deux MOSFETs (à la place des ASICs). Ensuite, nous avons peint toutes les surfaces avec la peinture thermique (figure 3.3).

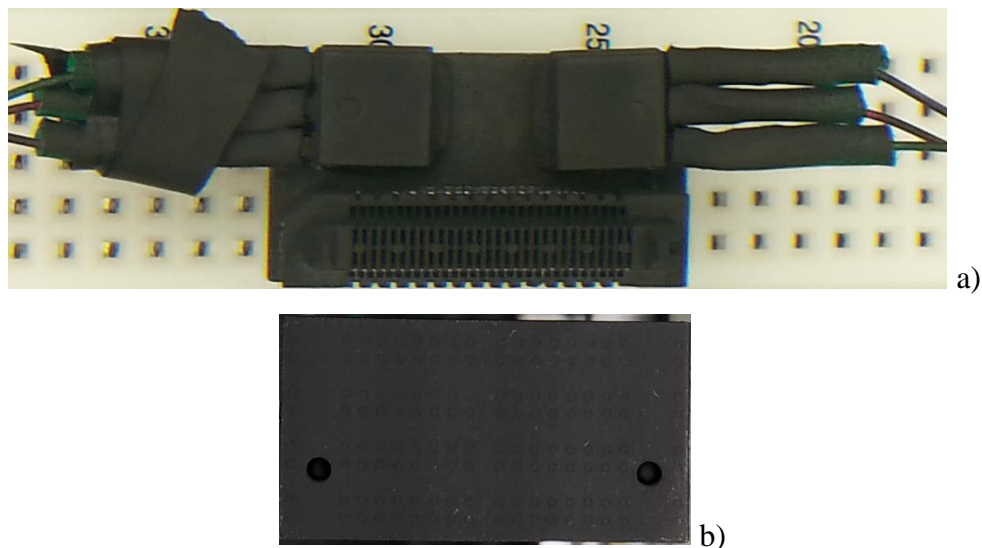


Figure 3.3. a) Deux MOSFETs attachés à la DBN-face 1 et la surface est peinte avec la peinture thermique ; b) La DBN face 2 est peinte avec la peinture thermique

Nous avons alimenté un seul MOSFET, et nous avons augmenté graduellement sa puissance (pas à pas, autour 10 pas) de zéro à 1 watt. À chaque pas,

nous avons alloué le temps nécessaire pour que la température atteigne l'état d'équilibre avant de capturer une image thermique de la DBN-face 1 avec la caméra IR. À partir de cette série des images thermiques, nous avons utilisé un NCS pour extraire T_{B1MAX} à chaque pas (de chaque image thermique). Ensuite, nous avons produit la courbe de tendance de $T_{B1}(P_e)$ par régression linéaire et en réglant le point d'interception avec l'axe vertical à 21 °C (température ambiante au moment de la mesure) comme suit :

$$T_{B1}(P_e) = \left| \frac{dT_{B1MAX}}{dP_e} \right| P_e + T_A \quad (3.1)$$

Par la suite nous avons calculé la température de jonction $T_J(P_D)$ comme suit :

$$T_J(P_e) = \left(\left| \frac{dT_{B1MAX}}{dP_e} \right| P_e + T_A \right) + (\theta_{JB1} \cdot P_e) = \left| \frac{dT_J}{dP_e} \right| P_e + T_A \quad (3.2)$$

Où $\frac{dT_{B1MAX}}{dP_e}$ et $\frac{dT_J}{dP_e}$ (°C/W) sont les pentes respectives ; P_e (W) est la puissance dissipée équivalente ; T_A (°C) est la température ambiante (T_A est considérée comme constante pendant toute la durée de l'expérience) ; θ_{JB1} (°C/W) est la résistance thermique entre la jonction du MOSFET et la DBN-face 1 où $\theta_{JB1} = \theta_{JC} = 2,2$ °C/W ($\theta_{JC} = 2,2$ °C/W de la fiche technique du MOSFET).

3.3.2 Résultats et discussions

La figure 3.4 montre la courbe de température de jonction du MOSFET en fonction de variation de puissances et qui a les identités suivantes :

$$T_{J(P_e)} = (58,448P_e + T_A) + (2,2 \cdot P_e) = 60,648P_e + T_A \quad (3.2 - a)$$

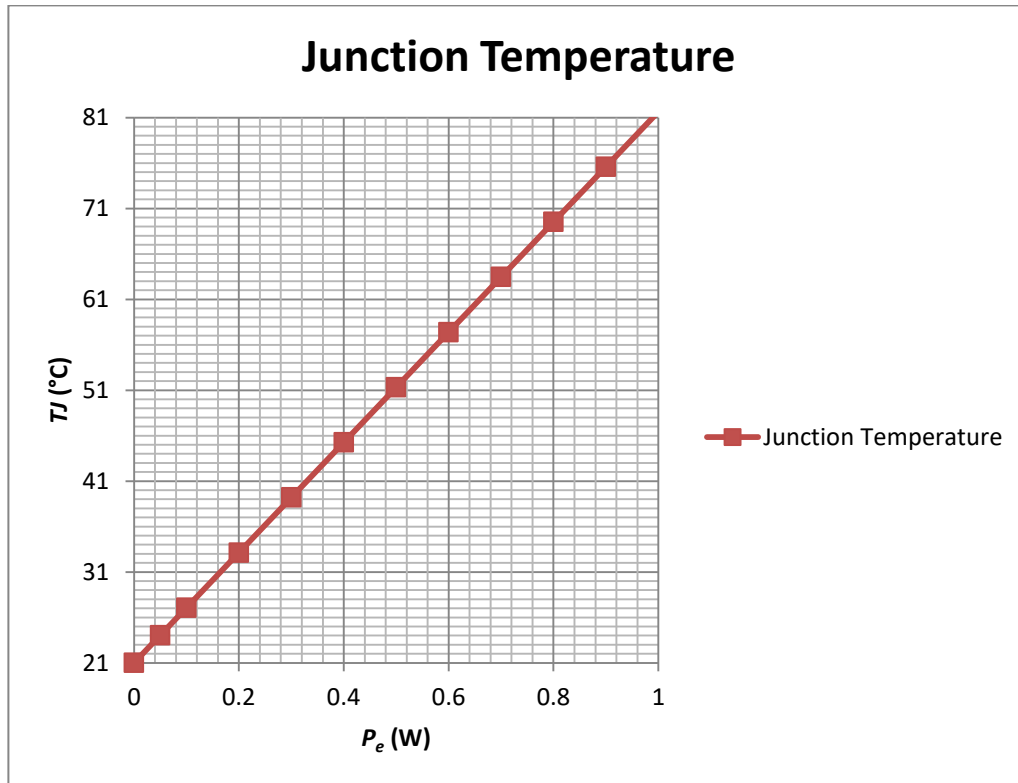


Figure 3.4. Courbe de température de la jonction du MOSFET en fonction de la variation de puissances équivalentes.

3.4 MESURE DE TEMPÉRATURES ET DE PUISSANCES ÉQUIVALENTES SUR CHAQUE ASIC

Le but ici est d'estimer la contribution thermique de chaque ASIC à l'échauffement de la jonction de l'autre ASIC, donc trouver la température de la jonction T_j , et d'estimer la puissance équivalente P_e sur chaque ASIC (bien sûr en supposant que la DB est sous tension). En effet P_e est la somme de : la puissance P_D générée par l'ASIC même, et de la puissance équivalente P_e atteint la jonction de cet ASIC à partir du deuxième ASIC de la même DB.

3.4.1 Méthodes

Nous avons utilisé les mêmes configurations et circuit que dans la section précédente (3.3).

Nous avons alimenté un seul MOSFET (MOSFET 1) avec une P_D égale à 550 mW (qui est équivalente à la puissance d'un ASIC de la DB) et nous avons alloué la température d'atteindre le plateau à l'état d'équilibre. Pour effectuer les mesures, nous avons servi de la caméra IR pour mesurer la température de la DB-face 1 (le réglage de l'émissivité est montré à la section 3.6). Ensuite, nous avons utilisé le principe de la superposition thermique en estimant que la résistance thermique est la même dans les deux sens sur l'axe des x. cela aide à simplifier la mesure, car nous n'avons pas à refaire les mêmes mesures sur le deuxième MOSFET (le chemin thermique dans les deux directions x et -x entre les deux ASICs est presque symétrique).

Les paramètres thermiques sont extraits comme suit :

$$T_{J1} = T_{C1} + (\theta_{JC} \cdot P_D) \quad (3.3)$$

$$T_{J2} = T_{C2} - (\theta_{JC} \cdot P_D) \quad (3.4)$$

$$T_J = T_{J1} + T_{J2} - T_A \quad (3.5)$$

$$P_{Je} = \frac{T_{J1} + T_{J2} - 2T_A}{dT/dP_e} \quad (3.6)$$

Où P_D est la puissance dissipée de l'ASIC (550 mW) ; θ_{JC} est la résistance thermique de jonction-à-boîtier du MOSFET (équivalente à θ_{JB1} de l'ASIC), elle est égale à 2.2 °C/W ; T_{C1} est la température de boîtier du MOSFET 1 (équivalente à T_{B1} sous l'ASIC 1 de la DB) ; T_{C2} est la température de boîtier du MOSFET 2 (équivalente à T_{B1} sous l'ASIC 2 de la DB) ; T_J est

la température de jonction de l'ASIC (dans le cas où les deux ASICs contribuent de 550 mW chacun) ; P_{Je} est la puissance équivalente de jonction de chaque ASIC (dans le cas où les deux ASICs contribuent de 550 mW chacun) ; T_A est la température ambiante (°C) ; et $\frac{dT}{dP_e}$ est la pente (de la section 3.3).

3.4.2 Résultats et discussions

La figure 3.5 -a montre l'image thermique de la DB-face 1 d'un MOSFET (MOSFET 1) avec une P_D égale à 550 mW (qui est équivalente à la puissance d'un ASIC de la DB) en état permanent. Et la figure (3.5-b) montre la DB-face 2 de la même mesure. À partir des résultats de cette mesure, nous avons calculé les paramètres thermiques suivants :

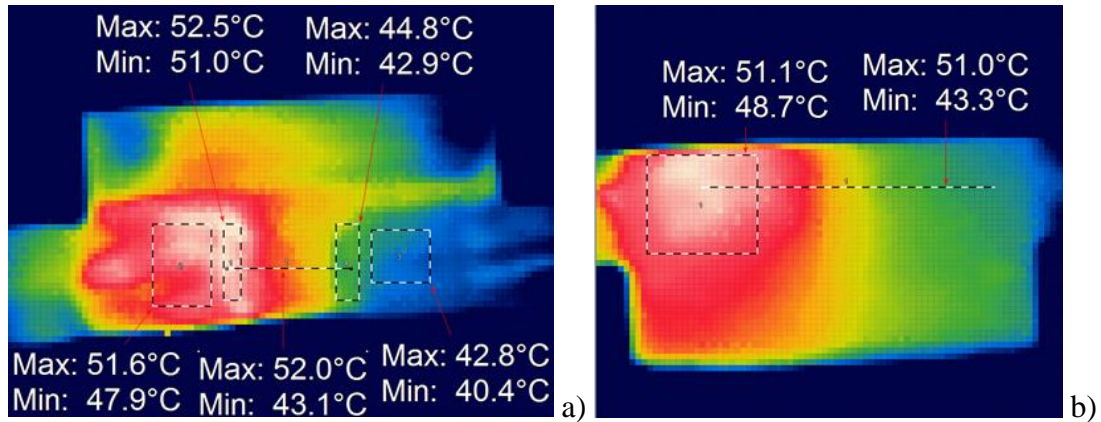
$$T_{J1} = T_{C1} + (\theta_{JC} \cdot P_D) = 52 + (2,2 \times 0,55) = 53,21^\circ C \quad (3.3 - a)$$

$$T_{J2} = T_{C2} - (\theta_{JC} \cdot P_D) = 43,1 + (2,2 \times 0,55) = 41,89^\circ C \quad (3.4 - a)$$

$$T_J = T_{J1} + T_{J2} - T_A = 53,21 + 41,89 - 20 = 75,1^\circ C \quad (3.5 - a)$$

$$P_{Je} = \frac{T_{J1} + T_{J2} - 2T_A}{dT/dP_e} = \frac{53,2 + 41,89 - 2 \times 20}{60.648} = 0,91 \text{ Watts} \quad (3.6 - a)$$

Ces résultats montrent que la puissance dissipée équivalente de jonction P_{Je} de chaque ASIC de la DB est autour 0,91 Watt. Ce qui va générer une température de jonction T_J de l'ASIC en état permanent, dans une condition d'application normale d'autour de 75,1 °C.



3.5 LES RÉISTANCES THERMIQUES CARACTÉRISTIQUES SPATIALES DE LA DB EN DIRECTION DE L'AXE DES X

Comme le titre de cette section l'indique, le but ici est de mesurer les résistances thermiques caractéristiques spatiales en direction de l'axe des x sur la DB. Nos mesures indiquent que les pics thermiques les plus sévères se situent sous les sources de chaleur (ASICs). Ces pics constituent les pires endroits à refroidir, car ils sont ombragés par la structure de ces derniers. Les deux ASICs et les zones exposées de la DB-face 1 de chaque côté de chaque ASIC sont alignés sur l'axe des x , et ils constituent des endroits potentiels pour appliquer un air convectif forcé pour atteindre et refroidir ces pics thermiques sur la DB-face 2. Dans cette expérience nous cherchons à trouver l'efficacité de la DB à conduire la chaleur dans la direction de l'axe des x , dont les résistances thermiques caractéristiques dans cette direction même.

Les données IR collectées dans ces expériences sont évaluées par des méthodes numériques à l'aide des NCSs. Les résistances thermiques caractéristiques discrètes spatiales par unité de distance ($C^\circ/W \cdot mm$) sur la DB-face 2 dans la direction de l'axe des x sont désignées par la fonction discrète $\Psi_{B2}(x,y)$ qui est:

$$\Psi_{B2}(x, y) = \frac{|T(x, y) - T(x + 1, y)|}{T(x, y) - T_A(x, y)} \cdot \frac{dT}{dP_e} \quad (3.7)$$

Où $\frac{dT}{dP_e}$ est la pente (de la section 3.3).

3.5.1 Méthodes

Nous avons utilisé les mêmes configurations et circuit que dans la section précédente (3.3).

Dans un premier cas, nous avons alimenté un seul MOSFET avec une P_D égale à 1 Watt (une seule source) et alloué la température d'atteindre le plateau à l'état d'équilibre. Par la suite, nous avons pris une mesure de la DB-face 2 avec la caméra IR. Le but de cette mesure est d'obtenir la somme des résistances thermiques caractéristiques discrètes spatiales sur la DB-face 2 à partir d'une seule source de chaleur dans la direction de l'axe des x. Les résistances thermiques caractéristiques sur la DB-face 2 dans la direction de l'axe des x sont obtenues en évaluant l'équation 3.7 par des méthodes numériques à l'aide des NCSs.

Un filtre de lissage gaussien avec $\sigma = 2$ est appliqué (par convolution discrète) sur $\Psi(x, y)$ pour atténuer les bruits de hautes fréquences sur les résultats.

Dans un deuxième cas, nous avons alimenté les deux MOSFETs pour que chacun d'entre eux génère une P_D égale à 550 mW (pour imiter les deux ASICs sous tension). Et nous avons alloué la température d'atteindre le plateau à l'état d'équilibre. Ensuite nous avons répété les mêmes procédures de mesure que dans le premier cas ci-haut. Le but ici est de comparer l'effet de variation de puissance, et de localisation des sources de chaleur sur le motif de résistances thermiques sur la surface de la DB-face 2. Plus précisément, dans les deux cas (premier et deuxième cas) nous cherchons à extraire les différentes caractéristiques de conduction thermiques. Car dans une PCB de plus de 10 couches (comme la DB), la conduction thermique est loin d'être

homogène, donc, la résistance thermique sur un point donné de la surface n'est pas constante, et est influencée par les chemins que les flux thermiques prennent pour atteindre ce point.

Enfin, dans un troisième cas, nous avons alimenté les deux ASICs d'une DB fonctionnelle et laissé la température atteindre le plateau à l'état d'équilibre pour ensuite prendre une mesure de la DB-face 2 avec la caméra IR. Le but ici est de comparer les résultats des ASICs avec celles des MOSFETs pour confirmer l'accord et la validité des résultats.

3.5.2 Résultats et discussions

La figure 3.7-a montre l'image thermique obtenue pour un MOSFET alimenté avec une P_D de 1 W. La figure 3.7-b montre une représentation visuelle du gradient de la température sur la DB-face 2. La température la plus élevée est égale à 73,2 °C sous la source de chaleur et la variation maximale mesurée de température sur la DB-face 2 est égale à 14 °C.

La figure 3.6-c montre $\Psi_{B2}(x,y)$ qui est la résistance thermique caractéristique par unité de distance de la DB-face 2. Chaque carré de la figure est égal à une distance de 0,25 mm. Les résultats montrent que la plus haute résistance thermique caractéristique se situe dans une bande étroite dans la direction de l'axe des y , juste au milieu de la DB-face 2 (environ 0,8 °C/W-mm en moyen). Ceci peut être dû à la faible densité de métal dans cette zone particulière. La résistance diminue pour atteindre son plus bas niveau sous les deux ASICs (environ 0,1 °C/W-mm). Puis elle augmente de nouveau aux deux extrémités de la PCB.

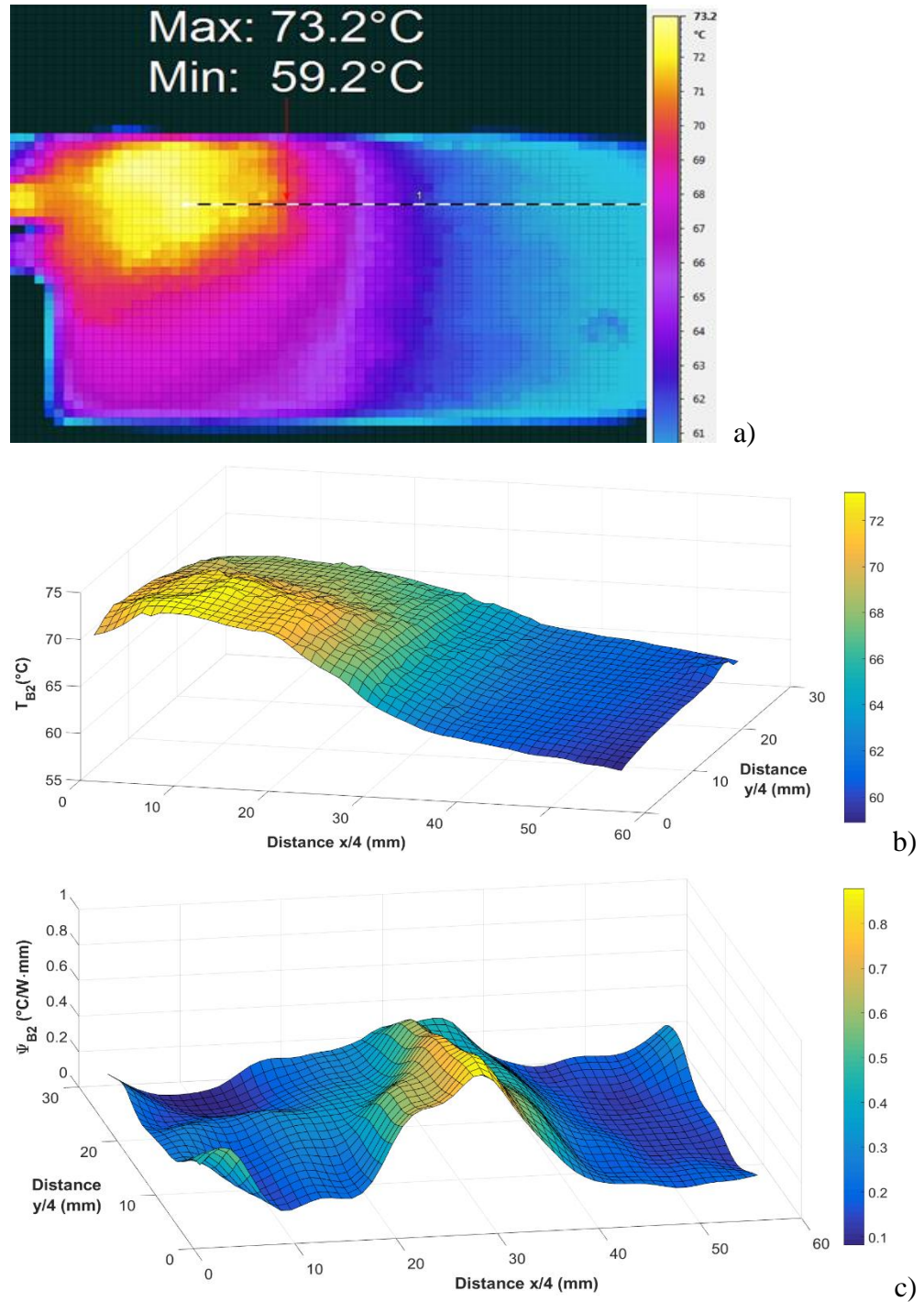
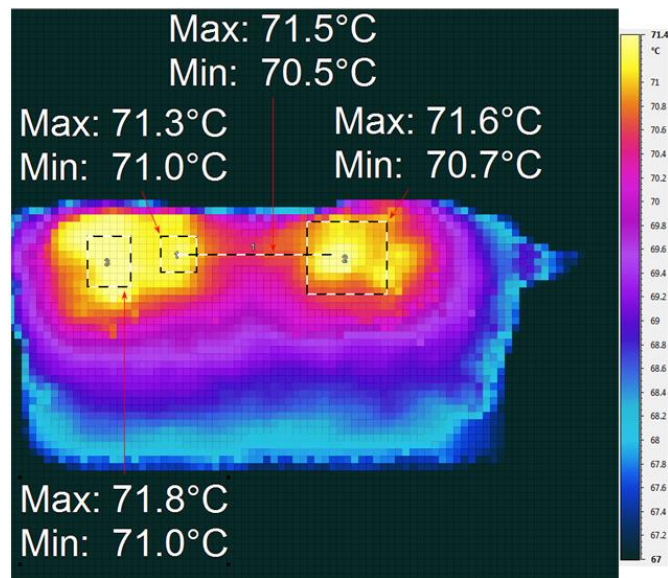


Figure 3.6. a) Image thermique de la DB-face 2 avec un seul MOSFET alimenté de $P_D = 1$ W; b) Gradient de température sur la DB-face 2 ; c) Les résistances thermiques caractéristiques spatiales $\Psi_{B2}(x,y)$.

La figure 3.7 -a montre l'image thermique obtenue pour deux MOSFETs alimentés avec une $P_D = 550$ mW chacun. La figure 3.7-b montre une représentation visuelle du gradient de la température sur la DB-face 2. La température la plus élevée est sous les sources de chaleur qui peut atteindre le $71,8$ °C et la variation maximale mesurée de température sur la DB-face 2 est égale à 5 °C.

La figure 3.7-c montre $\Psi_{B2}(x,y,)$ qui est la résistance thermique caractéristique par unité de distance de la DB-face 2. Chaque carré de la figure est égal à une distance de $0,25$ mm. Les résultats (figure 3.7-c) montrent la résistance thermique caractéristique varie entre $0,05$ °C/W-mm sous les ASICs, et elle monte à plus de $0,5$ °C/W-mm sur les extrémités de la PCB.



a)

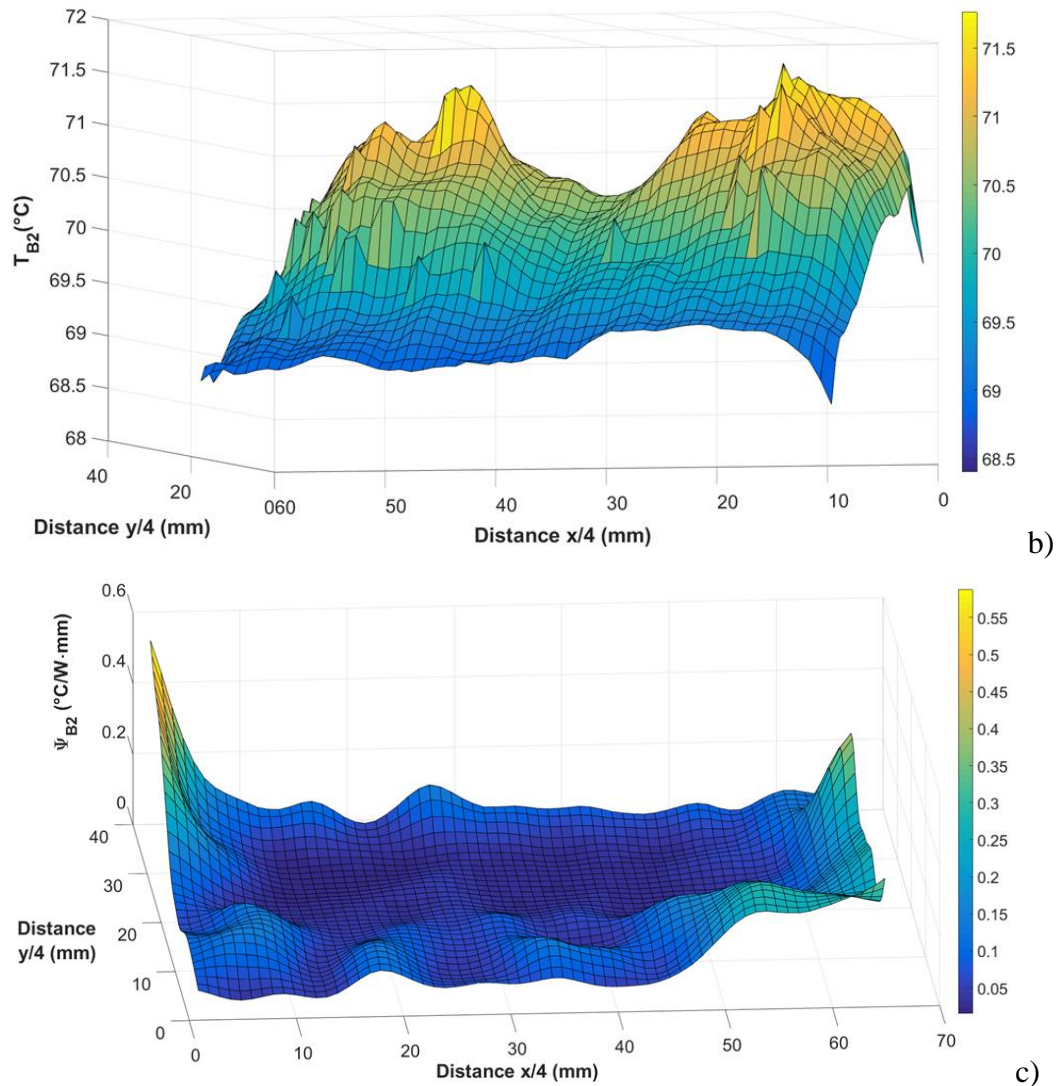


Figure 3.7. a) Image thermique de la DB-face 2 avec deux MOSFETs alimentés avec une $P_D = 550$ mW chacun ; b) Gradient de température sur la DB-face 2 ; c) La résistance thermique caractéristique spatiale $\Psi_{B2}(x,y)$ sur la DB-face-2.

La figure 3.8-a montre l'image thermique obtenue pour la DB-Face 1. La figure 3.8-b montre l'image thermique obtenue pour la DB-Face 2. La figure 3.8-c montre une représentation visuelle du gradient de la température sur la DB-face 2. La température la plus élevée est située sous les ASICs et qui peut atteindre 70,3 °C. La variation maximale mesurée de température sur la DB-face 2 est égale à 5,3 °C.

La figure 3.8-d montre $\Psi_{B2}(x,y)$ qui est la résistance thermique caractéristique par unité de distance de la DB-face 2. Chaque carré de la figure est égal à une distance de 0,25 mm. Les résultats (figure 3.8-d) montrent que la résistance thermique caractéristique varie entre 0,05 °C/W-mm sous les ASICs, et elle monte à plus de 0,5 °C/W-mm sur les extrémités de la PCB.

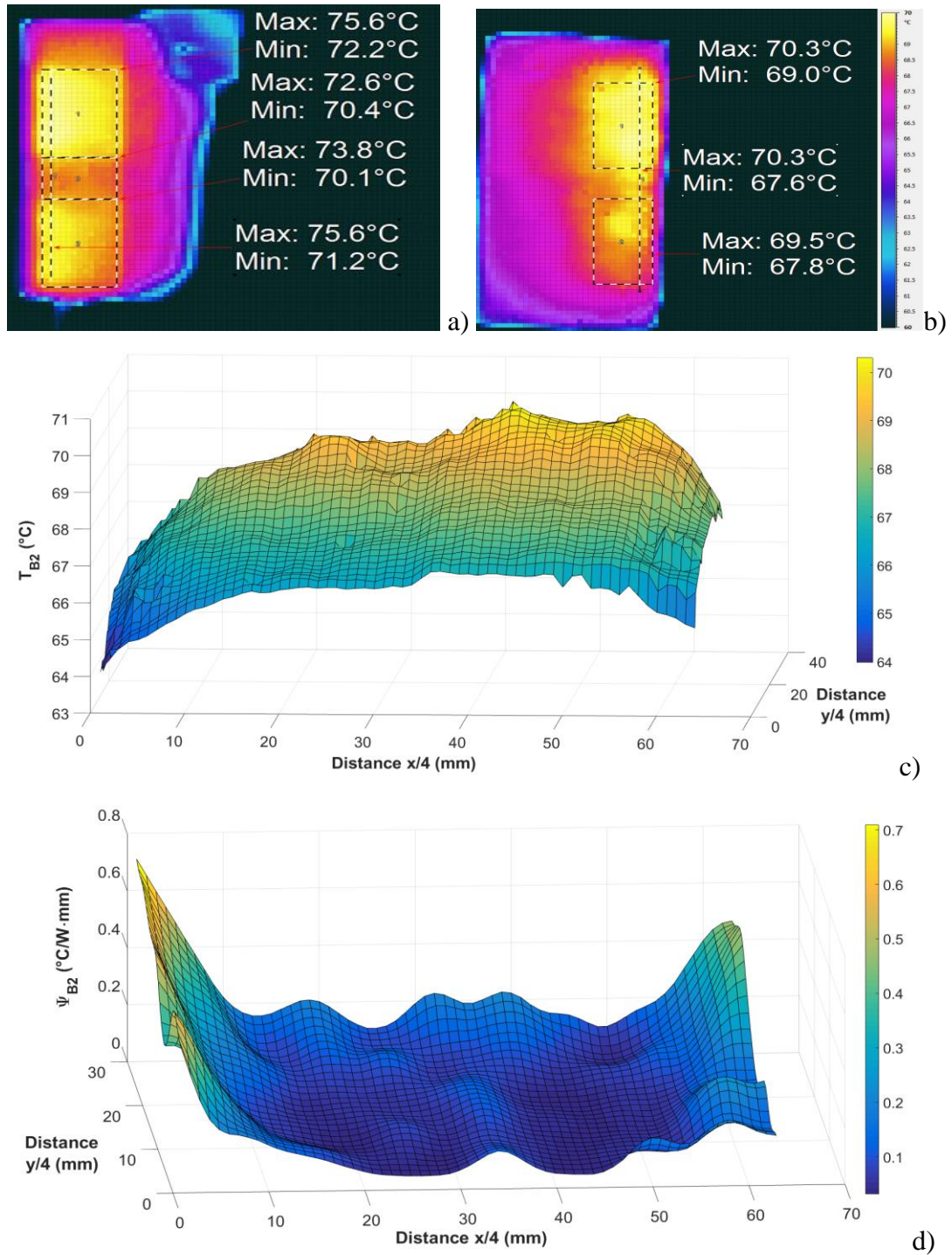


Figure 3.8. a) Image thermique de la DB-face 1 ; b) Image thermique de la DB-face 2 ; c) Gradient de température sur la DB-face 2 ; d) La résistance thermique caractéristique spatiale $\Psi_{B2}(x,y)$ sur la DB-face-2.

Comparant $\Psi_{B2}(x,y)$ de la figure 3.9-d avec celle de la figure 3.8-c nous trouvons qu'il sont en accords. Maintenant, comparant ces résultats (avec deux sources) à la figure 3.8-c (une seule source de 1 W), les résultats sont en accord sous les ASICs et aux extrémités de la PCB. On remarque une différence de la résistivité au milieu de la carte. Dans le cas de deux sources, les flux de chaleurs prennent plusieurs chemins parallèles (sur une plus grande surface), donc le résultant une résistance relativement faible au milieu de la PCB. Donc plus que les sources sont distribuées (ou dispersée) sur la surface, plus que la résistance thermique équivalente sera plus faible, donc une dissipation de chaleur plus efficace.

Dans une situation d'application réelle, la figure 3.8-c montre que les résistances thermiques les plus faibles se situent sous les ASICs en se dirigeant vers le centre de la carte. Donc une approximation de $\Psi_{B2}(x,y)$ entre 0,05 et 0,15°C/W-mm. Ces résultats indiquent que la zone centrale de la DB-face 2 représente une bonne conduction thermique, donc, potentiellement importante pour dissiper une bonne portion de la température sous les ASICs.

3.6 LES RÉSISTANCES DE CARACTÉRISATION THERMIQUE $\Psi_{B1,B2}$ ET LE RÉGLAGE DE L'ÉMISSIVITÉ DE LA PEINTURE THERMIQUE

Dans l'expérience précédente, nous avons estimé la conductivité dans la direction de l'axe des x. Dans cette expérience, nous avons fait la même chose, mais dans la direction de l'axe des z. Si nous voulons refroidir efficacement la DB en appliquant un air convectif froid sur la surface de la DB-face 1, les flux de chaleur sur la DB-face 2 vont être dissipés dans la direction de l'axe des z. donc nous estimons que les flux de chaleurs à partir des sommets des gradients (sous les ASICs) vont se propager sur la surface du plan x-y de la DB-face 2 et ces gradients (tout au long de la longueur de l'axe des x) vont être atténués par la dissipation dans la direction de l'axe des z. donc plus que la conductivité thermique est grande entre les deux surfaces de la

DB, plus que la DB-face 2 est plus facile à refroidir (surtout sous les ASICs). À noter que nous avons négligé les flux en direction de l'axe des z , car la surface disponible dans cette direction est négligeable. Elle est d'une part couverte par les connecteurs, et d'une autre par les ASICs. Comme nous allons voir plus tard dans ce chapitre, le connecteur ne dissipe pas de chaleur, mais plutôt il contribue légèrement à l'échauffement de la DB. En effet, à l'autre bout du connecteur (sur l'AB), il y a d'autres sources de chaleur non négligeables.

Alors, le but de cette expérience est d'obtenir un indice sur le taux de transfert de chaleur entre la DB-face 1 et la DB-face 2 dans un milieu d'application réel. Pour cela, nous avons mesuré $dT_{B1-B2}(x,y)$, qui est le différentiel de température entre la DB-face 1 et la DB-face 2 dans la direction de l'axe des z . ensuite une cartographie des résistances thermiques caractéristiques entre la DB-face 1 et la DB-face 2 (dans la direction de l'axe des z) peut être produite dans les NCS et projetée sur la DB-face 2 comme suit :

$$\Psi_{B1,B2}(x,y) = \Psi_{z1,z2}(x,y) = \frac{|T_{z1}(x,y) - T_{z2}(x,y)|}{T_{z1}(x,y) - T_A(x,y)} \cdot \frac{dT}{dP_D} \quad (3.8)$$

Où $\frac{dT}{dP_D}$ est la pente (obtenue à la section 3.3).

Un filtre de lissage gaussien avec $\sigma = 2$ est appliqué (par convolution discrète) sur $\Psi(x,y)$ pour atténuer les bruits de hautes fréquences sur les résultats de 3.8.

Nous avons également servi de la mesure avec une DBN pour déterminer l'émissivité de la peinture thermique et pour calibrer la caméra IR (pour une précision maximale de la mesure de température absolue). Dans le chapitre 3 et le chapitre 4 de cette thèse, la peinture thermique est utilisée dans toutes les mesures avec la caméra IR. La valeur de l'émissivité doit être ajustée dans la caméra IR pour toutes les

expériences où la peinture thermique est utilisée. Pour cela, nous avons servi des NCS pour produire les histogrammes de traces de densité de zones sélectionnées sur la DBN-face 2. L'histogramme de la zone située autour du thermocouple est utilisé pour le réglage de ε dans la caméra infrarouge comme suit :

$$\text{Régler } \varepsilon \text{ pour que } T_H = \max(\{f(x) : x = n, \dots, m\}) + o = T_{ic} + o \quad (3.9)$$

Où $y = f(x)$ est la fonction de densité (%); n et m sont l'échelle de température horizontale (°C); T_{ic} est la température mesurée par le thermocouple; T_H est une instance de température de la coordonnée horizontale de l'histogramme; o est un décalage de température utilisé pour garantir le respect du pire cas en compensant les pertes thermiques dues à des facteurs externes; comme la résistivité de la peinture thermique et la perte thermique dans la structure du thermocouple. Selon nos expérimentations précédentes, o peut être estimé à ≈ 0.2 °C.

Un histogramme d'une zone située en dehors de la zone de thermocouple peut également être utilisé pour comparer visuellement les deux populations et confirmer que la perte thermique dans le thermocouple est située dans des limites d'une marge acceptable. Par la suite, nous avons réglé progressivement le paramètre d'émissivité de la caméra IR jusqu'à ce que la condition de (x) soit satisfaite.

En principe, dans cette expérience, nous pouvons chauffer la DBN-face 1 avec un MOSFET (comme l'expérience précédente), mais la difficulté est qu'il faut effectuer les mesures thermiques spatiales avec la caméra IR sur la DB-face 1 et par la suite tourner la DBN pour mesurer la DBN-face 2. Par la suite, il faut associer chaque pixel de la DB-face 1 avec son correspondant sur la DB-face 2 ce qui n'est pas évident. Donc pour simplifier cette tâche, nous avons décidé de chauffer la DB-face 1 à une température homogène connue et associer chaque pixel de la DB-face 1 à une seule température de référence.

3.6.1 MÉTHODE

Dans un premier cas, nous avons utilisé une DBN et nous avons peinturé uniformément la DBN-face 2 avec une couche mince de la peinture thermique. La figure 3.9 montre la configuration de cette expérience dans laquelle la DBN est placée sur le dessus du four avec la DBN-face 2 est exposée à l'air de convection ambiant (visible dans la photo), tandis que la DBN-face 1 est exposée à l'air chaud à l'intérieur du four. Deux thermocouples sont utilisés pour capturer les températures. L'un est fixé sur la DBN-face 1 (la position n'est pas importante, car la température dans le four est homogène) et l'autre à la DBN-face 2. Le thermocouple sur la DBN-face 2 sert uniquement comme référence pour calibrer l'émissivité de la peinture thermique. La température de la DBN-face 2 est également mesurée à l'aide de la caméra IR. Cette dernière sert à calibrer l'émissivité et en même temps à calculer $\Psi_{B1,B2}(x,y)$. Le thermocouple sur la DBN-face 2 est installé approximativement au milieu de la surface (entre l'emplacement des deux ASICs). Un troisième thermocouple est utilisé pour mesurer la température ambiante. Nous nous référons aux: JESD51-2a et JESD51-12-01 de JEDEC en tant que directives générales pour les mesures de thermocouple et des caractérisations thermiques.

Nous avons augmenté la puissance du four progressivement tout en observant le thermocouple sur la DBN-face 2 jusqu'à ce qu'il atteigne un plateau d'équilibre à environ 70°C. Une $T_{B2\ MAX} = 70\ ^\circ\text{C}$ est approximativement équivalente au même niveau de température généré au même endroit par une DB en application réelle (deux ASICs fonctionnels de 550 mW chaque). Par la suite, toutes les températures de la DBN-face 1, DBN-face 2, l'ambiante et de la caméra IR seront capturées au même instant.

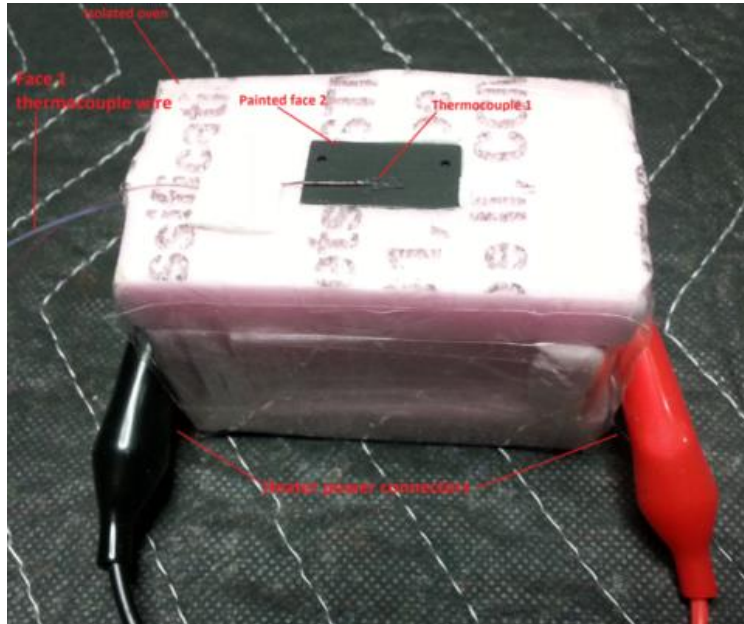


Figure 3.9. Configuration de mesure du four de la DBN.

Dans un deuxième cas, nous avons répété exactement les mêmes mesures que dans le premier cas (avec une DBN), mais cette fois avec une DB (incluant les ASICs et autres composants) et aucun thermocouple sur la DB-face 2 (dans le premier cas, ce thermocouple a juste servi pour le réglage de l'émissivité). Le but ici est d'étudier l'effet ou l'influence des ASICs sur les résistances caractéristiques thermiques en direction de l'axe des z .

La figure 3.1 montre la configuration de l'expérience où la DB est installée dans le four.

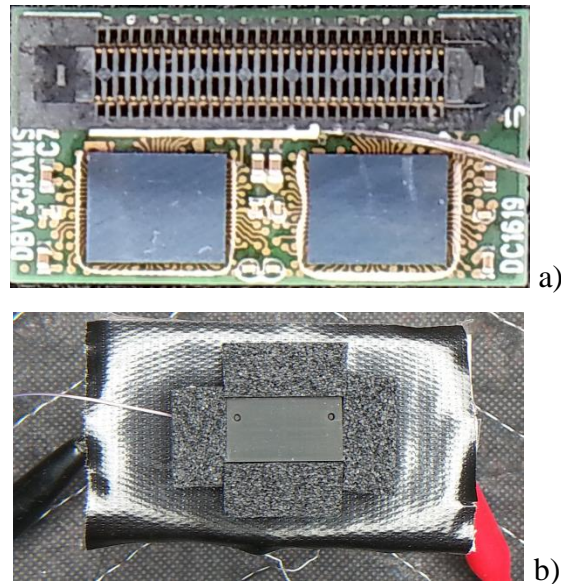


Figure 3.10. Mise en place de l'expérience ; a) Sur la face DB 1, on peut voir le thermocouple fixé entre l'ASIC et le connecteur ; b) le PCB au-dessus du four et prête pour l'expérience, on peut voir le fil du thermocouple sortir du côté gauche du dessus du four.

3.6.2 Résultats

Nous commençons d'abord par le calibrage de l'émissivité de la peinture thermique. La figure 3.11 montre les résultats de l'image IR de la DBN-face 2 que nous avons mesurés à l'aide de la caméra IR et traités à l'aide d'un NCS. En servant de l'équation 3.9, nous avons trouvé que l'émissivité de la peinture thermique est : $\varepsilon = 0,93$.

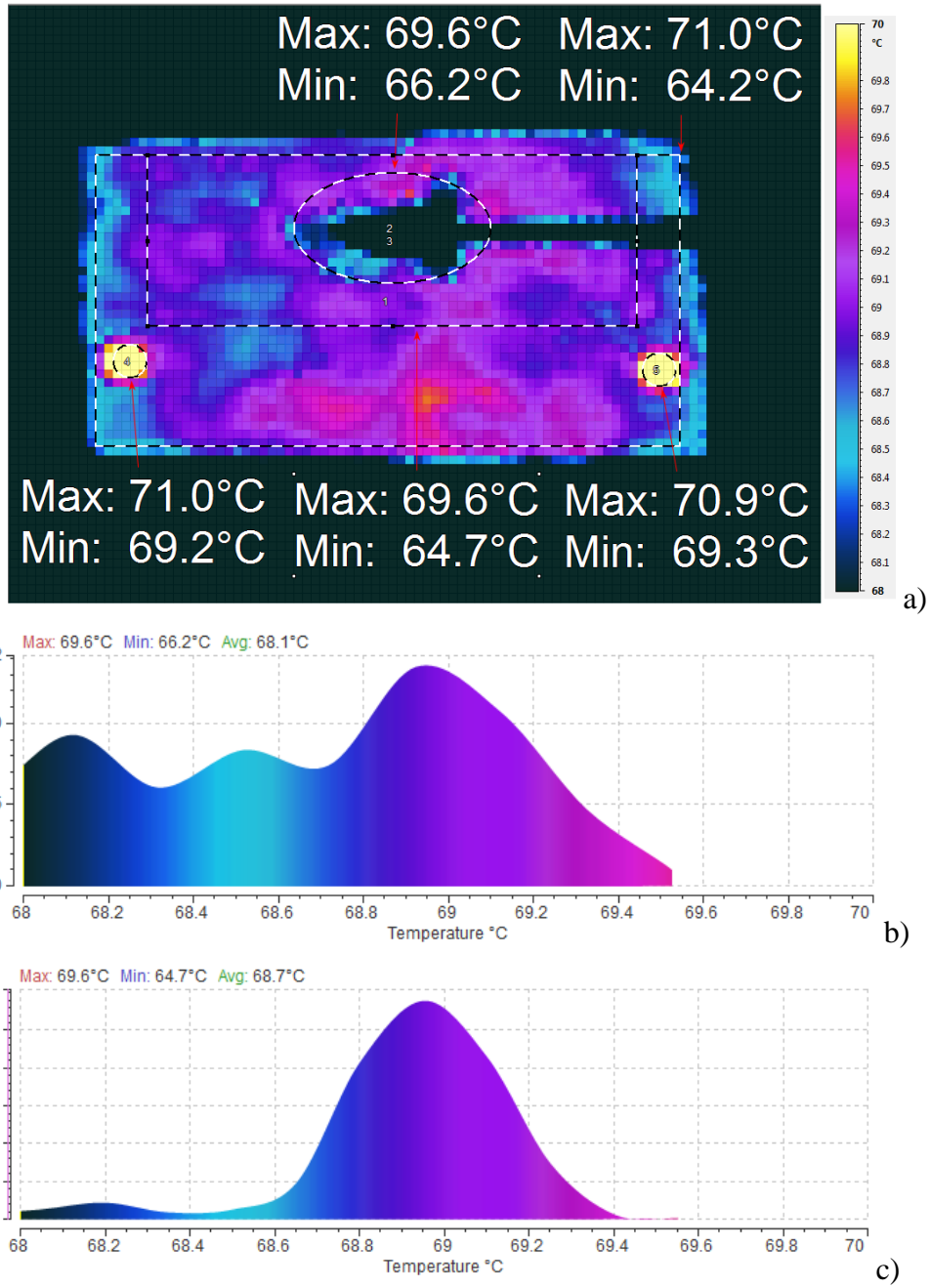


Figure 3.11. a) L'image IR de la DBN-face 2 (après l'ajustement de ϵ); b) histogramme de la zone autour de l'emplacement du thermocouple ; c) Histogramme de la zone excluant le connecteur et les bords externes de la carte.

Pour les mesures sur la DBN, les lectures de thermocouples sont montrées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Lectures de thermocouples.

$T_{DBN1} (^{\circ}C)$	71,55
$T_{DBN2} (^{\circ}C)$	68,60
$T_A (^{\circ}C)$	21,74

En rappelant l'équation (3.8) nous obtenons la cartographie de la figure 3.12-b des résistances thermiques caractéristiques entre la DBN-face 1 et la DBN-face 2 (dans la direction de l'axe des z) $\Psi_{B1,B2}(x, y)$. Les résistances caractéristiques thermiques sont situées entre 2,5 et 3,5 $^{\circ}C/W$ (l'effet du thermocouple sur la surface n'est pas considéré dans l'estimation de la résistance thermique). La figure 3.12-a montre la photo de la zone visée pour la mesure de $\Psi_{B1,B2}(x, y)$ sur la DBN-face2.

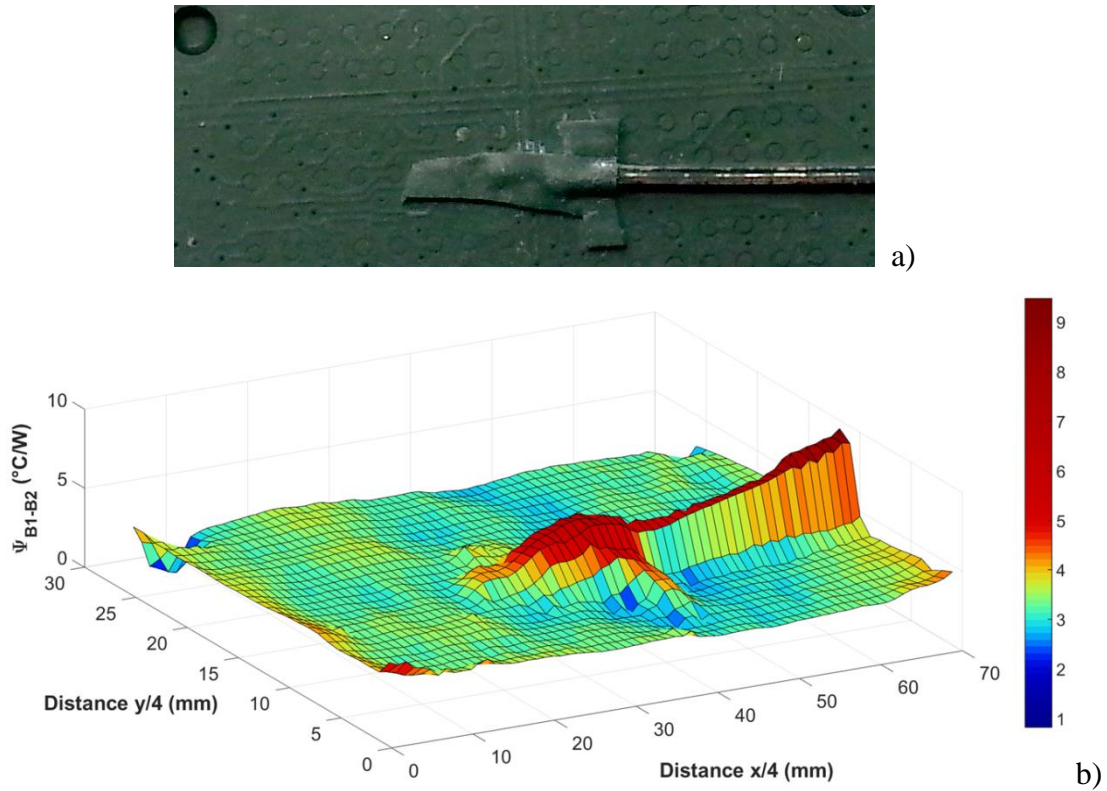


Figure 3.12. a) Photo de la zone visée sur la DBN-face 2 ; b) la cartographie $\Psi_{B1,B2}(x, y)$ de la DBN-face 2, les résistances caractéristiques thermiques se situent entre 2,5 et 3,5 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ (l'effet du thermocouple sur la surface n'a pas été pris en compte dans l'estimation de la résistance thermique).

Pour les mesures sur la DB, les lectures des thermocouples sont indiquées dans le tableau 3.2.

Table 3.2 Lecture de thermocouples.

$T_{DB1} (^{\circ}\text{C})$	72,6
$T_{DB2} (^{\circ}\text{C})$	N/A
$T_A (^{\circ}\text{C})$	21,0

La figure 3.13 montre la photo IR brute de la DB-face 2 dans le four obtenu par la caméra IR après avoir atteint l'état d'équilibre.

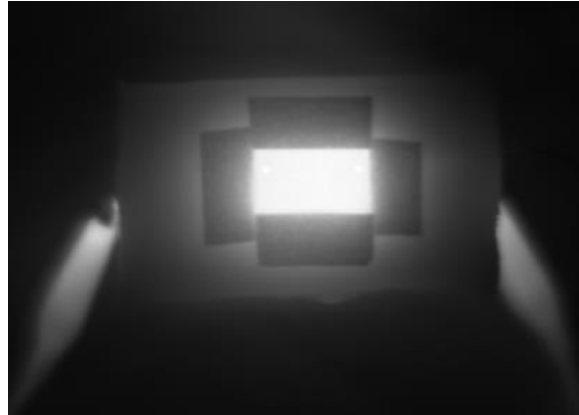


Figure 3.13. La photo IR brute de la DB-face 2 dans le four obtenu par la caméra IR.

En rappelant l'équation (3.8) nous obtenons la cartographie de la figure 3.14-c des résistances thermiques caractéristiques entre la DB-face 1 et la DB-face 2 (dans la direction de l'axe des z) $\Psi_{B1,B2}(x, y)$. Les résistances caractéristiques thermiques sont situées entre 2,25 et 4,75 °C/W. Et la figure 3.14-a montre les manipulations sur l'image IR brute pour extraire les fonctionnalités requises, et la figure 3.14-b montre l'histogramme de la fréquence de températures.

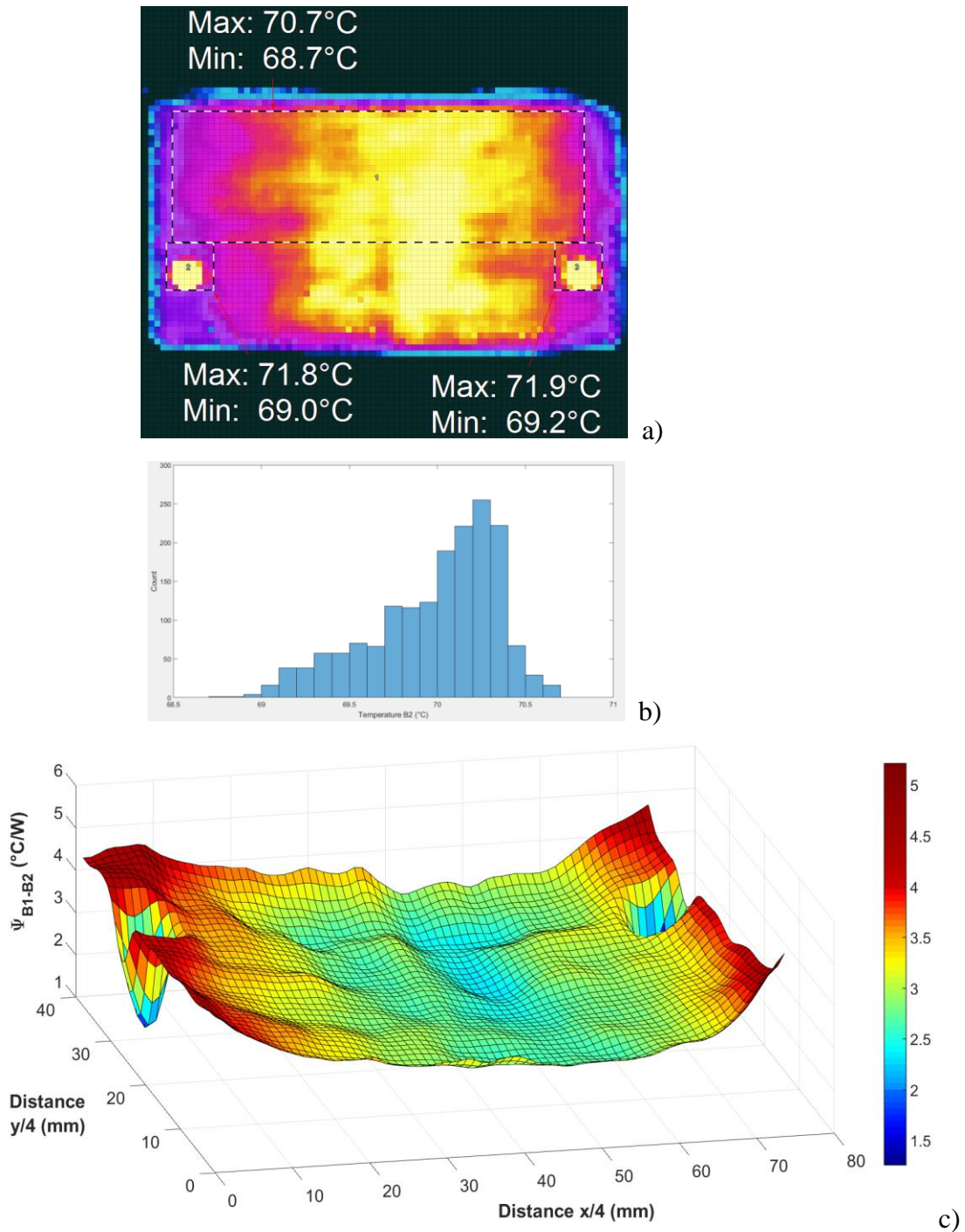


Figure 3.14. Les résultats de l'expérience sur la DB-face 2 ; a) Gradient de température ; b) histogramme de la fréquence de températures ; c) $\Psi_{B1,B2}(x, y)$ (n'inclut pas de la zone sous le connecteur).

3.6.3 Discussion

Cette expérience a exposé les résistances thermiques caractéristiques totales équivalentes et le flux thermique entre les deux faces de la DB. Cela signifie que, dans des conditions convectives homogènes idéales sur la DB-face 1 (où la résistance convective peut être ramenée à zéro), et que le DB2 dissipe environ 1 watt de puissance thermique, dT_{B1-B2} peut être amené à une gamme de 2,3 à 3,0 °C.

En comparant la cartographie des résistances thermiques caractéristiques de la DBN-face 2 à celle de la DB-face 2, nous concluons que la présence des ASICs entraîne une légère réduction du flux thermique commençant sous chaque ASIC vers l'extérieur de chaque ASIC (sur l'axe des x). L'ASIC ajoute une résistance thermique qui est estimée à 1° C/W. ceci indique que les ASICs représentent une faible résistance thermique. Dans tous les mesures, la zone située entre les deux ASICs (près des bords intérieurs des ASICs) a montré les plus faibles résistances (une $\Psi_{B1,B2}(x, y)$ de 2,2 à 3,0° C/W). Donc, c'est une zone potentiellement importante un refroidissement efficace de la DB-face 2.

La zone du connecteur montre une bonne conductivité à travers les broches métalliques du connecteur, mais en analysant la stabilité thermique du DB (plus loin au chapitre 4), nous avons trouvé des sources de chaleur non négligeables sur l'AB (auprès du connecteur). La figure 3.15 montre l'image infrarouge et le transfert de chaleur entre l'AB et la DB. En effet, la température du côté de l'AB est supérieure à celle du côté de la DB. Ceci indique un léger flux de chaleur de l'AB vers la DB, donc le connecteur ne peut pas être considéré comme un bon candidat pour dissiper de chaleur de la DB (ce problème sera étudié au chapitre 4).

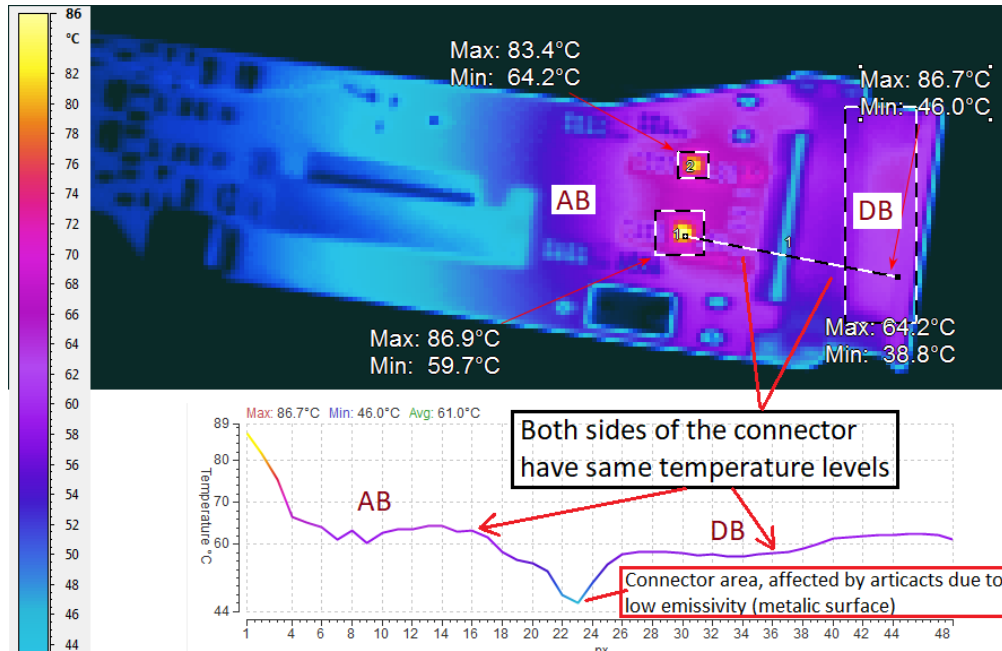


Figure 3.15. Contribution d'autres sources de chaleur sur l'AB à l'augmentation de la température chaleur de DB.

3.7 DISSIPATION DE PUISSANCE THERMIQUE À PARTIR DE LA DB-FACE 1 AVEC CONVECTION FORCÉE

Le but de cette expérience est de vérifier empiriquement et avec des études de cas l'efficacité d'évacuation de la chaleur de la DB-face 2 à partir de la DB-face 1 tout en appliquant tout en appliquant de l'air convectif forcé à cette dernière. Nous avons donc étudié l'efficacité du refroidissement de la DB-face 2 avec trois études de cas :

- 1- À partir des ASICs top seulement (dessus des boîtiers) ;
- 2- À partir des ASICs top et des zones exposées de la DB-face 1 (surtout la zone du centre, entre les deux ASICs) ;
- 3- À partir des ASICs top et des zones exposées de la DB-face 1 avec des radiateurs sur les ASICs top.

3.7.1 Méthodes

Pour les 3 études de cas, une DB a été installée dans le LTM et alimentée par ce dernier (figure 3.3). La DB a été allouée suffisamment de temps pour chauffer jusqu'à ce qu'elle atteigne la température de l'état stable dans des conditions de température ambiante (autour de 70 °C max sur DB-face 2). Ensuite, nous avons appliqué les conditions de convections d'air forcées.

3.7.1.1 Dissipation de puissance thermique à partir des ASIC-Top

Le but de cette expérience est de déterminer la résistance thermique totale θ_{CB2} entre le sommet du boîtier de l'ASIC (ASIC-Top) et de la DB-face 2. Et de mesurer le différentiel de température entre l'air convectif et la DB-face 2 ($T_{B2}-T_{air}$). En bref, cette mesure fournit des informations précieuses sur le degré de refroidissement de la surface 2 en extrayant exclusivement la chaleur de chaque ASIC-top. Par conséquent, nous avons attaché un HS conçu sur mesure (dissipateur thermique de type 1, du chapitre 4 plus bas). Ce dissipateur va couvrir toute la surface de la DB et il va dissiper la chaleur uniquement à partir de chaque ASIC-top. L'HS a été conçu de manière à s'insérer dans le petit espace disponible entre DB et l'AB. En outre, l'HS a été conçu pour fournir un pontage au-dessus des composants autour des ASICs. L'HS a donc un bon contact thermique uniquement avec les surfaces supérieures des deux ASICs (figure 3.16). De cette façon, lorsqu'un air de convection forcé est appliqué sur le dessus du HS, il dissipera de la puissance thermique uniquement des ASICs tops.

Un ventilateur est couplé à un orifice rectangulaire et est monté pour souffler un air de convection forcé et dirigé perpendiculaire à la surface de l'HS. La vitesse de l'air est estimée entre 10 m/s et 12 m/s. Nous visons ici à réduire la résistance convective à son minimum pratique (un phénomène plus ou moins équivalent au cold plate décrit par la méthode de JEDEC ou par Texas Instrument pour la mesure de θ_{JC}

[39, 129]). Nous avons utilisé deux thermocouples, le premier est pour mesurer la température de l'air convectif et le deuxième est pour mesurer la température de l'ASIC-top. Et nous avons mesuré la DB-face 2 à l'aide de la caméra infrarouge. La figure 3.16 montre la configuration de cette expérience.

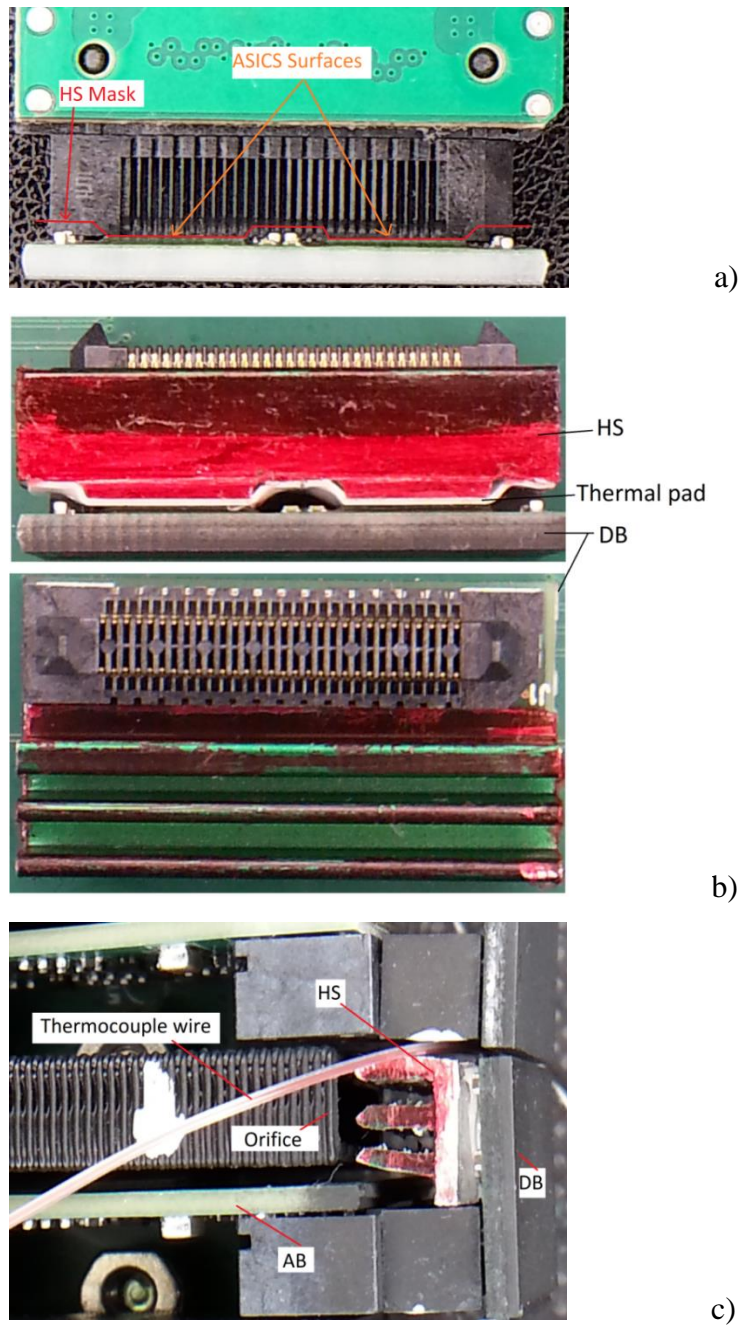


Figure 3.16. a) Le masque de HS type 1, on voit le pontage au-dessus des composants autour des ASICs ; b) Vue latérale et dessus du HS sur les deux ASICs; c) Mise en place de l'expérience, on voit l'orifice au-dessus du HS et le câble du thermocouple.

3.7.1.2 Dissipation de puissance thermique de la DB-face 1 sans HS

Le but de cette expérience est de mesurer le différentiel de température entre l'air convectif et la DB-face 2 ($T_{B2} - T_{air}$). En bref, cette mesure fournit des informations précieuses sur la capacité de refroidir la DB-face 2 à partir de la DB-face 1 sans rien installer sur ce dernier. Par conséquent, nous avons utilisé la même configuration d'expérience que la section précédente, mais sans le thermocouple sur le ASIC-top. Lorsqu'un air de convection forcé est appliqué sur la DB-face 1, il dissipera un pourcentage élevé de la chaleur du circuit imprimé (face 1) et un pourcentage plus faible de l'ASIC top.

3.7.1.3 Dissipation de l'énergie thermique par DB-face 1 et par les HS sur les ASICs-top

Cette méthode utilise la même configuration d'expérimentation que la section précédente. Mais nous allons évaluer une combinaison des deux expériences précédentes pour mesurer le différentiel de température entre l'air convectif et la DB-face 2 ($T_{B2} - T_{air}$). Par conséquent, deux petits HS sont conçus sur mesure pour s'ajuster exactement au sommet de l'ASIC (figure 3.17). Ce sont les mêmes dissipateurs thermiques de type 2 que nous allons utiliser au chapitre 4 plus bas. Ces HSs (type 2) ici sont moins efficaces que le type 1, car ils ont une surface plus petite. Mais, ce que nous visons ici est de savoir s'il est plus avantageux si l'air de convection dissipe la chaleur en parallèle de la surface exposée de la carte et des HS. Le compromis ici est que la dissipation à partir des ASICs-top va être moins efficace qu'avec un HS de type 1, mais plus efficace que sans HS. Cependant, l'avantage est que nous visons deux chemins de convections qui sont parallèles et probablement efficaces, ce qui réduit la résistance thermique totale à la DB-face 2.

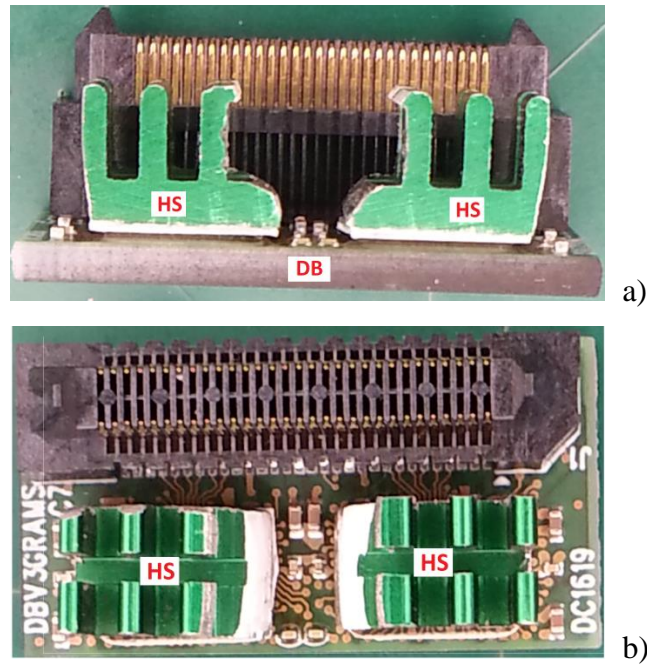


Figure 3.17. a) Vue de côté des deux petits HS sur chacun des ASICs; b) Vue de dessus.

3.7.2 Résultats et discussion

La figure 3.18 montre les images thermiques du DB en temps permanent avant d'appliquer la convection d'air forcé. La figure 3.18-a montre l'image thermique de la DB-face 2 où $T_{B2(max)} = 70,3 \text{ }^\circ\text{C}$. La figure 3.18-b montre l'image thermique de la DB-face 1, où $T_{Top(max)} = 75,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (sans HS). Nous ne pouvons pas mesurer $T_{Top(max)}$ quand les radiateurs sont installés. Mais les mesures sur la face 2 n'indiquent pas de changement significatif de $T_{B2(max)}$ avec tout dissipateur thermique installé sur la face 1 (réduction de la température d'environ $1 \text{ }^\circ\text{C}$). Donc sans convection forcée, l'effet de ces radiateurs sur la $T_{B2(max)}$ est négligeable.

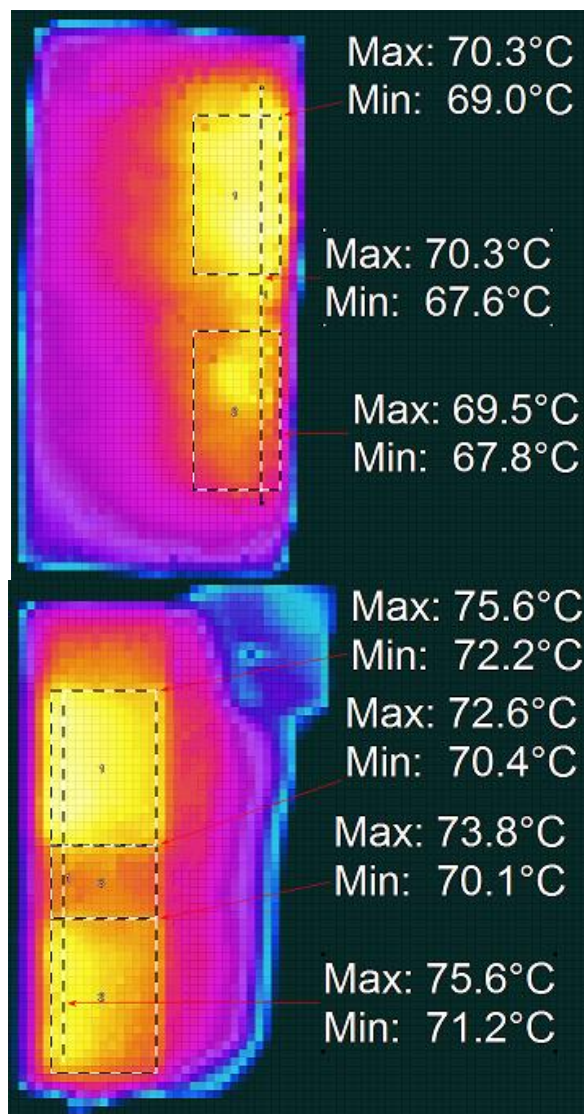


Figure 3.18. Image thermique à l'état d'équilibre de la DB alimentée par le LTM; a) image thermique de la DB-face 2; b) Image thermique sur la face 1.

Ensuite nous avons appliqué la convection forcée pour les trois études de cas et nous avons comparé les résultats dans le tableau 3.3 avec un grand HS (type 1), deux petits HS (type 2) et aucun HS sur les ASICs-top.

Tableau 3.3 Tableau comparatif des trois méthodes.

	$T_{conv. Air} (^{\circ}C)$	$T_A (^{\circ}C)$	$T_{Top} (^{\circ}C)$	$T_{B2} (^{\circ}C)$	$dt T_{B2}-T_{air} (^{\circ}C)$	$\approx \theta_{topB2} (^{\circ}C/W)$
No HS	21,0	20,0	n/a	27,6	6,60	n/a
L HS	21,0	20,0	23,2	26,9	5,90	4,10
2 HS	21,0	20,0	n/a	25,6	4,60	n/a

Les trois méthodes ont montré une faible dt . Mais le cas avec les HS de type 2 donne le rendement le plus efficace avec $T_{B2}-T_{air} = 4,6$ °C seulement. Ces résultats indiquent qu'une solution de convection d'air forcé est réalisable pour refroidir la température des détecteurs TEP à une valeur égale ou inférieure à 32 °C. La résistance thermique $\theta_{topB2} = 4,1$ °C/W que nous avons obtenu ici est en accord avec les mesures de caractérisations précédentes dans ce chapitre ($\Psi_{B1,B2}$ avec le four)

3.8 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre nos méthodes de caractérisations thermographiques avec caméra IR. Nous avons appliqué ces derniers (avec une étude de cas) pour caractériser la DB du scanneur labPET II. Nos résultats montrent qu'un air de convection forcé par impact de jet, directement au-dessus de la DB-face 1 est faisable pour garder la température de la DB-face 2 à $T_{B2max} = 32$ °C. Et le fait d'installer un petit HS (type 2) sur chaque ASIC donne un résultat relativement efficace.

Dans le chapitre 4 plus bas de cette thèse, nous allons ajuster empiriquement les paramètres de la convection d'air forcé à des valeurs pratiques, étudier la stabilité thermique de la DB, et faire la conception finale du système de stabilisation thermique de la DB.

CHAPITRE 4

CONCEPTION ET OPTIMISATION DES PARAMÈTRES ET DES RÉSULTATS DE LA CAI

Ce chapitre est consacré pour étudier la méthode de convection cellulaire par impact de jet d'air (CAI) et de montrer la conception finale du système de refroidissement et de stabilisation thermique. Donc, l'objectif final est de refroidir et de stabiliser la température de la carte DB du scanneur LabPET II et surtout la température de la surface 2 T_{B2} , où les pixels du détecteur TEP sont installés.

4.1 INTRODUCTION

Le débit d'air et la température sont les deux variables à contrôler. La stabilité thermique peut être affectée par: la variation de la puissance dissipée (P_D) dans le système, la température ambiante ou les variations du débit d'air de convection. Les termes convectifs de l'air sont dépendants de sa densité, comme la variation de la pression atmosphérique. Une diminution de la pression atmosphérique est principalement due à une augmentation de l'altitude par rapport au niveau de la mer (par exemple, des villes en haute altitude) [129]. Cette augmentation rend l'air plus mince et moins efficace pour le transfert de chaleur par convection. Le tableau 4.1 montre le facteur de multiplication de convection relatif à l'altitude. Pour maintenir la stabilité thermique dans la cible souhaitée, ces sources de perturbation doivent être compensées. Par conséquent, deux contrôleurs PID sont mis en œuvre, l'un pour agir sur la température de l'air convectif afin de la stabiliser, et l'autre pour maintenir une pression d'air statique stable à l'intérieur du système de convection.

La figure 4.1 montre le schéma fonctionnel de la CAI, où un système à deux étages est mis en œuvre. Un système de plaques froides contrôlé par PID fournit une température d'air stable à l'intérieur de la cavité du scanneur. Ensuite, des souffleuses à turbines (air blowers) pompent l'air à l'intérieur d'un système de conduit de distribution. Un capteur de pression et un second contrôleur PID agissent sur la vitesse des souffleuses à turbines pour maintenir un flux d'air convectif stable à

travers une mer de cellules (sea of cells). Un actionneur non linéaire avec une sortie PWM contrôle la vitesse des souffleuses à turbine.

Pour éviter une condensation d'eau sur la structure froide du scanneur, il faut surveiller le point de rosée. Donc un capteur d'humidité est utilisé pour surveiller le point de rosée. Le taux d'humidité dans la cavité froide du scanneur est indépendant du taux d'humidité ambiant à l'extérieur de ce dernier grâce au système de convection à boucle fermée. Cela permet une plus grande plage de réglage de la température en abaissant le point de rosée. [130] montre une équation pratique pour calculer le point de rosée. Mais ici il faut faire attention, car un air moins humide augmente le risque de décharge électrostatique (ESD), un ioniseur d'air est fortement recommandé à l'intérieur de la cavité pour neutraliser les ions positifs et négatifs de l'air. La mise à la terre des dissipateurs de chaleur sera également une bonne idée. À l'intérieur du scanneur nous avons mesuré un taux d'humidité $h = 22\%$ avec une température de 17 °C . Une isolation thermique de surfaces extérieures du scanneur est encore recommandée, car elle va améliorer beaucoup le point de rosée. Une telle isolation est encore recommandée pour réduire le niveau de bruit (dBA) causé par les souffleuses à turbine et le soufflement de l'air dans les conduits. Sans entrer dans les détails, il faut suivre les méthodes fournies par le fabricant des souffleuses pour minimiser le bruit et ajuster le rapport de débit et de pression statique.

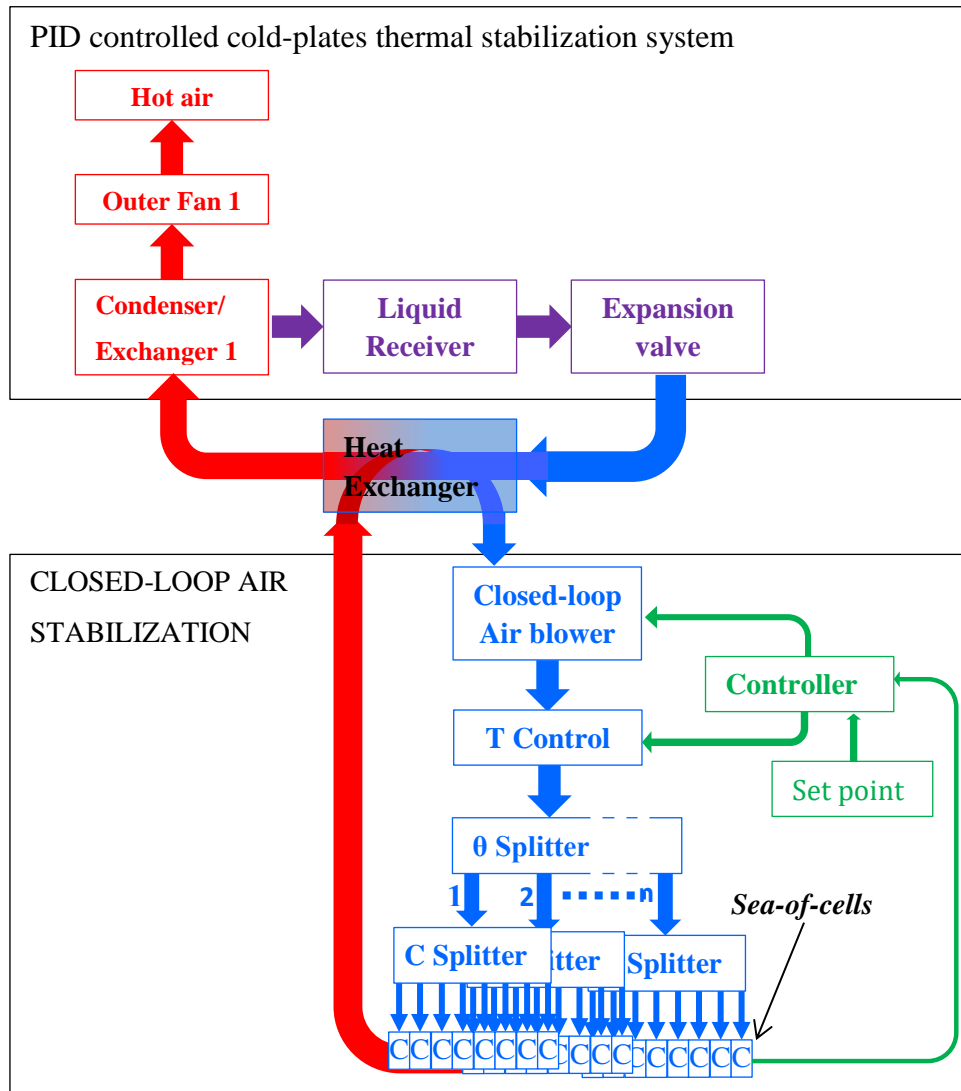


Figure 4.1. Le bloc diagramme de la CAI.

Tableau 4.1 le facteur de multiplication de convection relative à l'altitude [129]

Altitude (ft)	Factor
0	1
3000	1.1
5000	1.14
7000	1.17
8350	1.2

4.1.1 Principe de la CAI

La solution de stabilisation thermique que nous proposons est basée sur la technique de jet d'impact d'air et plus précisément le refroidissement et stabilisation thermique cellulaire par impact de jet d'air (CAI) des DBs. L'air convectif (qui a une température et une vitesse contrôlables) est dirigé pour frapper directement et perpendiculairement la DB-face 1 (un jet d'impact d'air). Donc l'échange thermique (de solide à fluide) se produit sur cette dernière. Ensuite, l'air chaud sera récupéré et dirigé vers une thermopompe (plaques froides) pour extraire la chaleur. Enfin, les soufflantes à turbine recirculent l'air pour compléter la boucle fermée de la CAI.

La figure 4.2 montre le principe d'une cellule de cette méthode. Une chambre de compression maintient une pression statique d'air stable. L'air sera alimenté à travers une ouverture d'entrée qui est relativement grande par rapport à la somme des sorties (les buses). La différence de pression (dp) entre la chambre de compression et l'extérieur va créer un écoulement d'air avec un taux qui est dépendant de dp et de la surface de sortie de la buse. Donc une dp stable dans la chambre donne un débit d'air stable à la sortie. Chaque DB sera alimenté par une cellule de la CAI. La figure 4.2 montre une cellule qui a une géométrie rectangulaire. Nous avons choisi cette géométrie, car elle convient très bien avec les contraintes structurelles du scanner. La buse sera alignée empiriquement pour avoir un impact maximal sur la DB face 1 (où les deux ASICs sont situés).

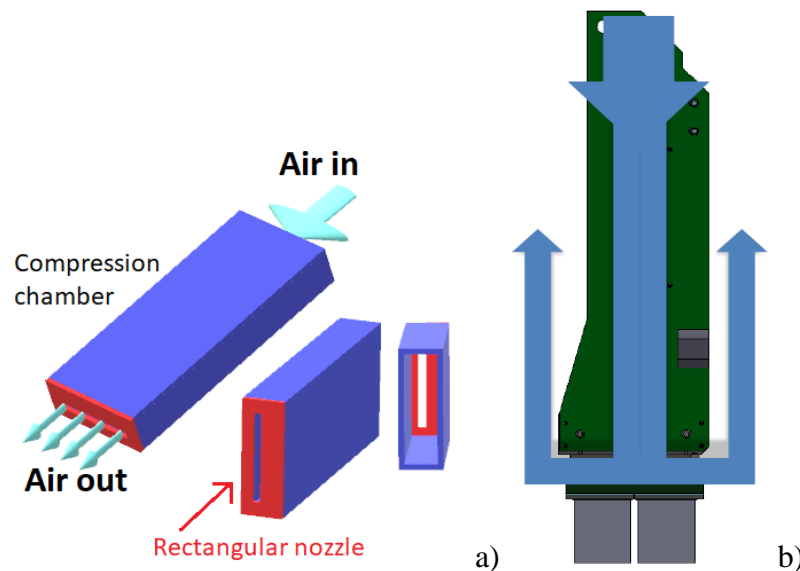


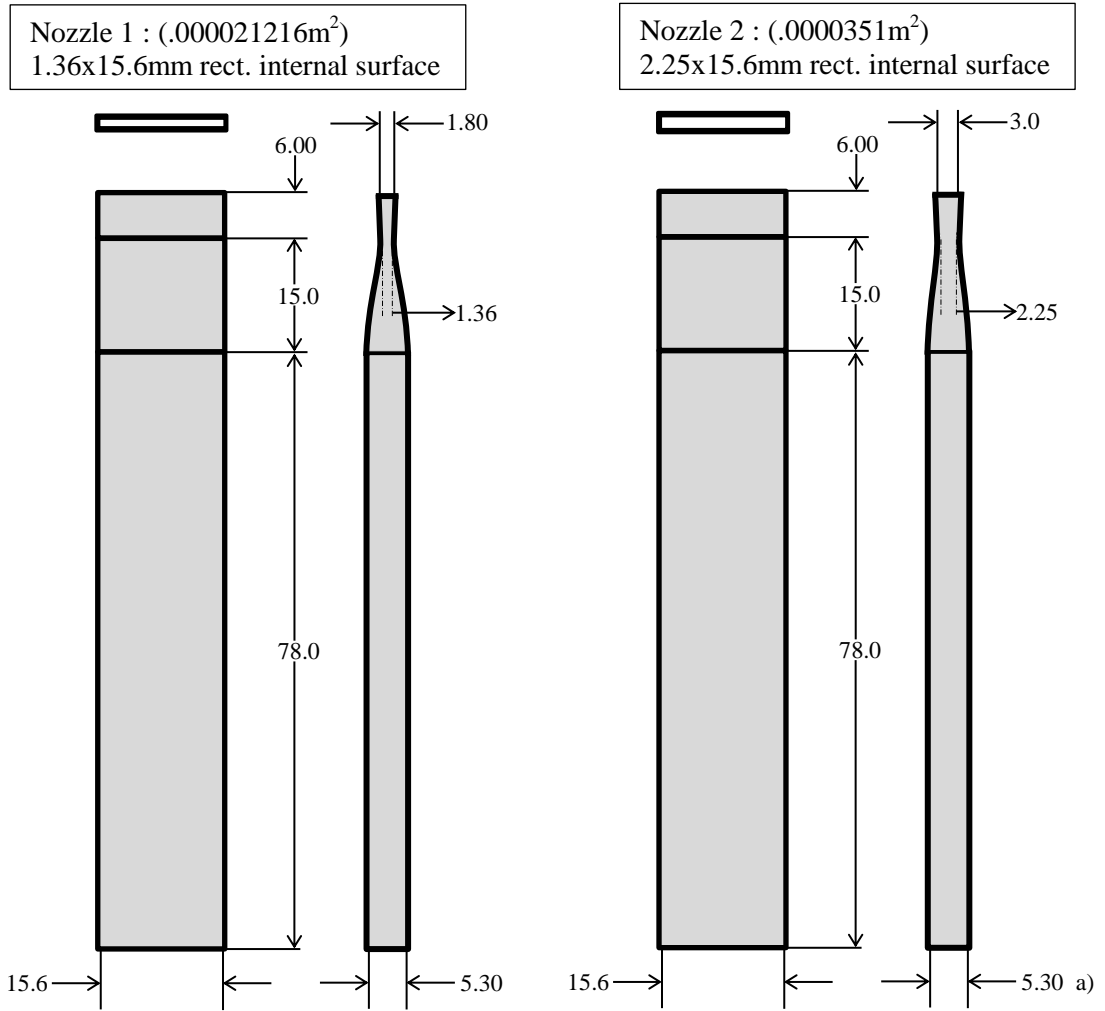
Figure 4.2. a) Block diagramme de la CAI; b) Le jet d'air froid frappe la surface 1 de la DB et il sera récupéré des deux côtés (comme le montre l'illustration).

En général, pour étudier et optimiser la CAI, nous avons manipulé plusieurs variables avec des méthodes empiriques et analytiques. Ces principales variables sont : la température (T), la pression statique (P_S), l'écoulement (E), l'ouverture hydraulique, la distance caractéristiques z , etc.

4.2 MÉTHODES MATÉRIELLES ET MATÉRIAUX

4.2.1 Matériels et matériaux

Nous avons fabriqué sur mesure les deux buses et les deux orifices de la figure 4.3. Ces buses et orifices sont fabriqués soit avec des tôles en aluminium ou soit en plastique (imprimé sur imprimante en 3D).



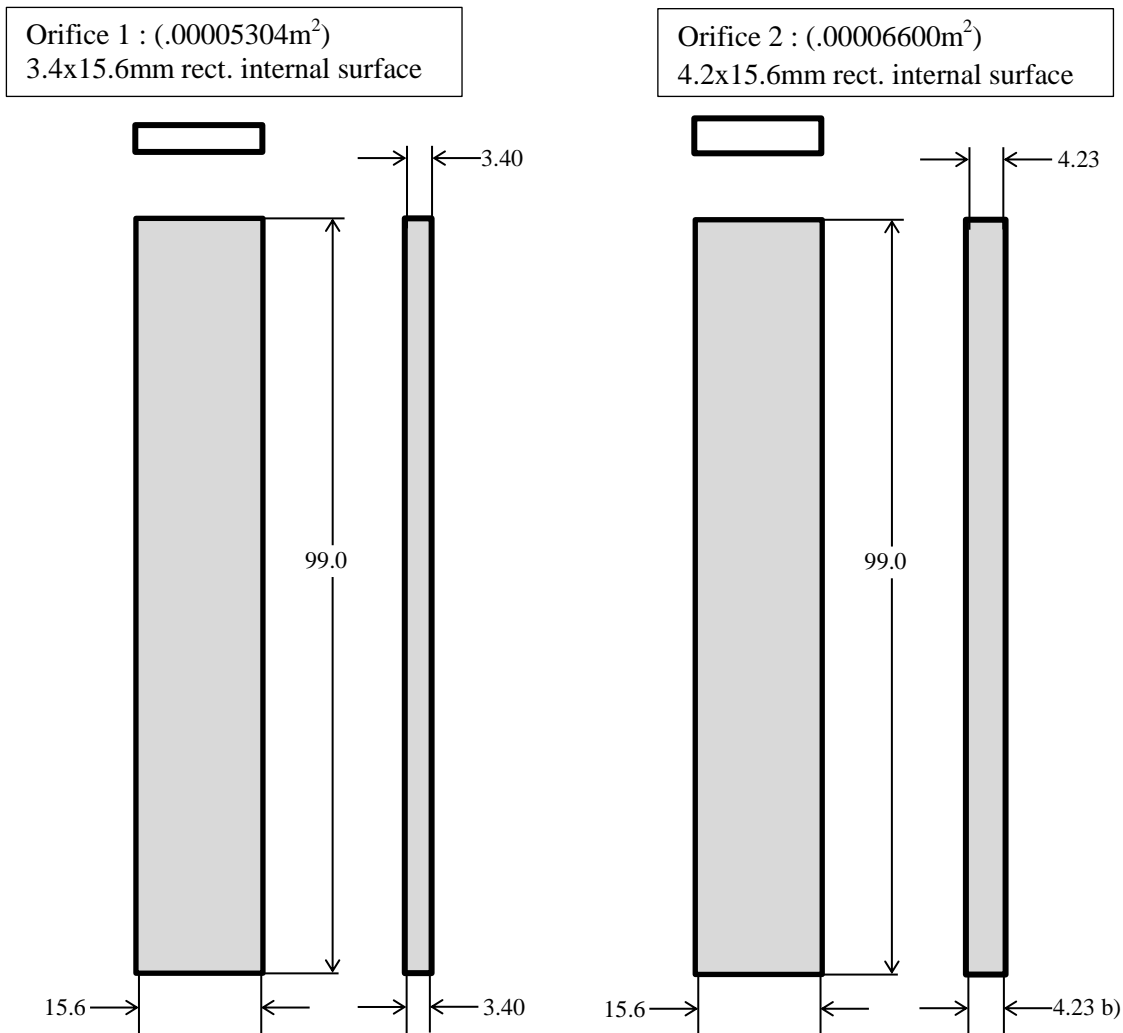


Figure 4.3. a) Deux buses b) Deux orifices.

La figure 4.4-a montre 8 cellules de l'orifice 1 avec leur chambre de compression « Pressure Regulation Chamber » (PRC) qui ont été imprimées sur imprimante 3D et installées sur une RB. Et la figure 4.4-b, montre une cellule de la buse 2 en aluminium.

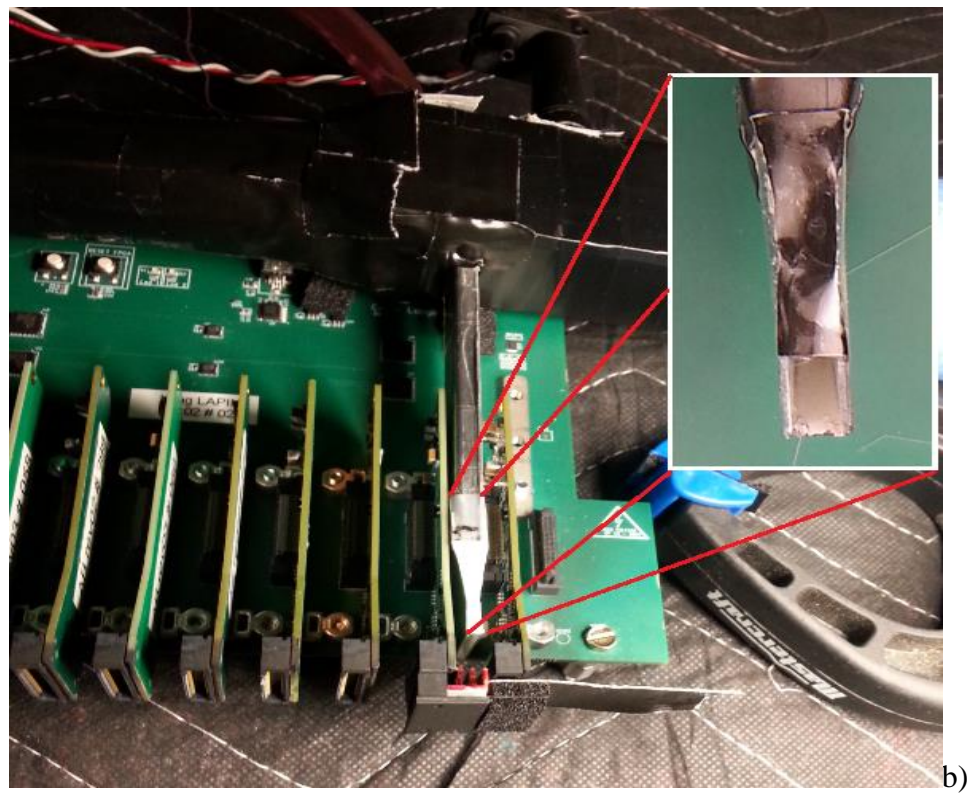
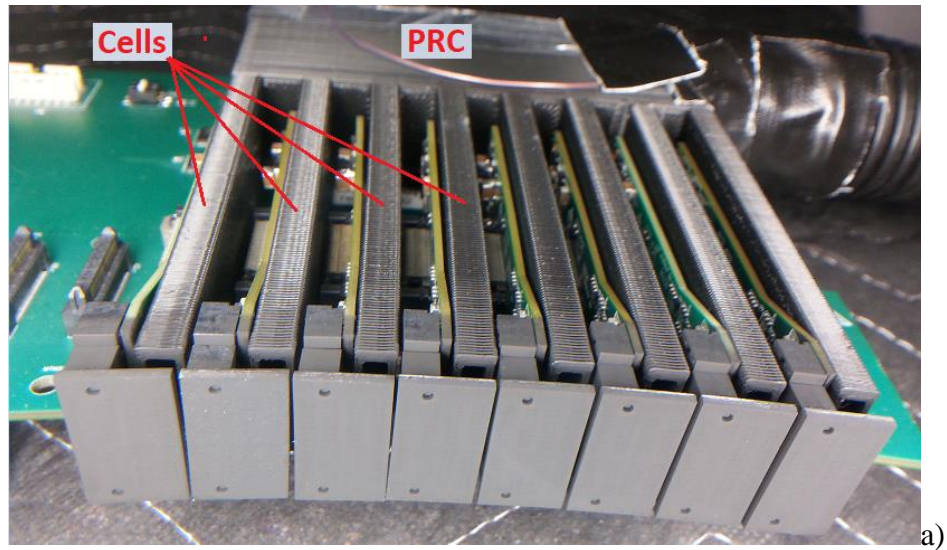


Figure 4.4. a) Huit cellules de l'orifice 1 ; b) une cellule de la buse 2.

Des radiateurs pour les ASICs de type 1 (T1) (les mêmes grands radiateurs utilisés dans le chapitre 3) et des radiateurs de type 2 (T2) (les mêmes petits radiateurs utilisés en chapitre 3).

Une souffleuse à turbine San Ace B97 de Sanyo Denki, Japon [131]

Capteur massique de débit d'air de type Venturi (Mass Air flow sensor) AWM5104VN de Honeywell Sensing and Control, USA. Il a une sortie linéaire F qui est capable de mesurer de 0 à 20 SLPM, avec $F = \frac{20 \cdot V_{Out}}{4} - 5$

Capteur de pression différentielle SDP816-125PA de Sensirion AG, ZH, Suisse. Il a la sortie (P_S) configurable de -125 à 125 Pa avec, $P_S = \frac{190 \cdot V_{Out}}{V_{DD}} - 38$ (pour la courbe linéaire).

Des pads thermiques (même que le chapitre 3)

Une radial board (RB) de LabPET II;

12 AB de labPET II;

12 DB de labPET II;

Un système de refroidissement à plaques froides... un système de refroidissement et de stabilisation à l'eau à l'extérieur du scanneur. Ce dernier est de type TF1400 de ThermoFisher scientificTM [131]

Deux échangeurs thermiques de type CC3065PHL de Noren [132]

Une caméra IR (même que ch.3);

Logiciels (même que CH 3)

4.2.2 Méthode de mesure de l'écoulement de l'air à la sortie d'une buse ou d'un orifice

La figure 4.5 montre le montage pour mesurer l'écoulement à la sortie d'une buse (ou orifice). Le capteur massique de débit d'air est accordé à la sortie de la buse. Une souffleuse avec une vitesse ajustable est accordée à l'entrée de la chambre à compression. Le capteur de pression est installé pour surveiller la pression d'air dans la chambre à compression. Ensuite nous avons augmenté en étapes la vitesse de la souffleuse (contrôlée en PWM) et nous avons associé chaque niveau d'écoulement à son équivalent en pression statique P_s . À cette bande de vitesse qui est relativement basse, la pression dynamique est négligeable (moins que 3% de la pression totale). Donc la pression totale dans la chambre à compression est relativement homogène et elle est estimée égale à la pression statique.

Il faut répéter cette étape pour chaque buse ou orifice avant de commencer chaque série de mesure. On le fait en avance, car le capteur d'écoulement doit être accordé à la sortie de la buse pour mesurer son écoulement ce qui n'est pas possible à réaliser pendant les mesures réelles sur le scanneur. Le principe ici est de faire associer chaque valeur d'écoulement avec son équivalent en pression dans la chambre de compression. Lorsque cette association est faite, nous pouvons maintenant débrancher le capteur d'écoulement, installer les cellules sur le matériel du scanneur, et utiliser la lecture de P_s pour avoir l'information sur l'écoulement à la sortie de la buse. Avec cette information sur l'écoulement, nous pouvons maintenant calculer la vitesse de l'air qui quitte la sortie de la buse. Accorder.

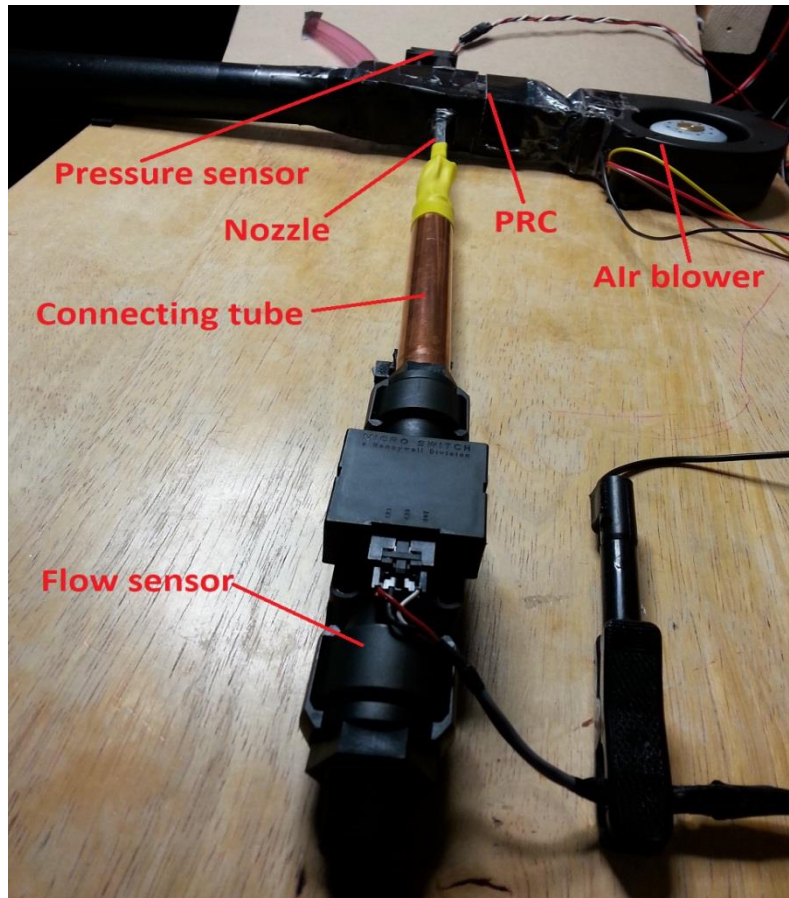


Figure 4.5. Le montage pour mesurer l'écoulement à la sortie d'une buse (ou orifice).

4.3 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.3.1 Mesure de l'effet de variation de température T_C sur T_{B2}

Pour cette expérience, nous avons servi de tous les buses et orifices. Nous avons pris plusieurs séries de mesures, sans et avec des radiateurs que nous avons installés sur les deux ASICs de la DB. Nous avons pris les mesures sans radiateur pour les orifices seulement. Ces mesures ont servi pour un but comparatif seulement. Même chose pour le radiateur de type 1 (le grand radiateur), nous avons pris juste une seule série de mesure avec l'orifice 1. Nous avons utilisé le radiateur de type 2 (petit radiateur sur chaque ASIC) pour tous les buses et orifices. Pour toutes les mesures,

nous avons gardé les valeurs de P_S et de T_A constantes à 35 Pa et à 20 °C respectivement. Ensuite, nous avons varié la température de l'air convectif T_C de 12 à 20 °C et nous avons mesuré avec la caméra IR les températures en modes permanents sur la DB-face 2. Les résultats de l'expérience sont montrés à la figure 4.6.

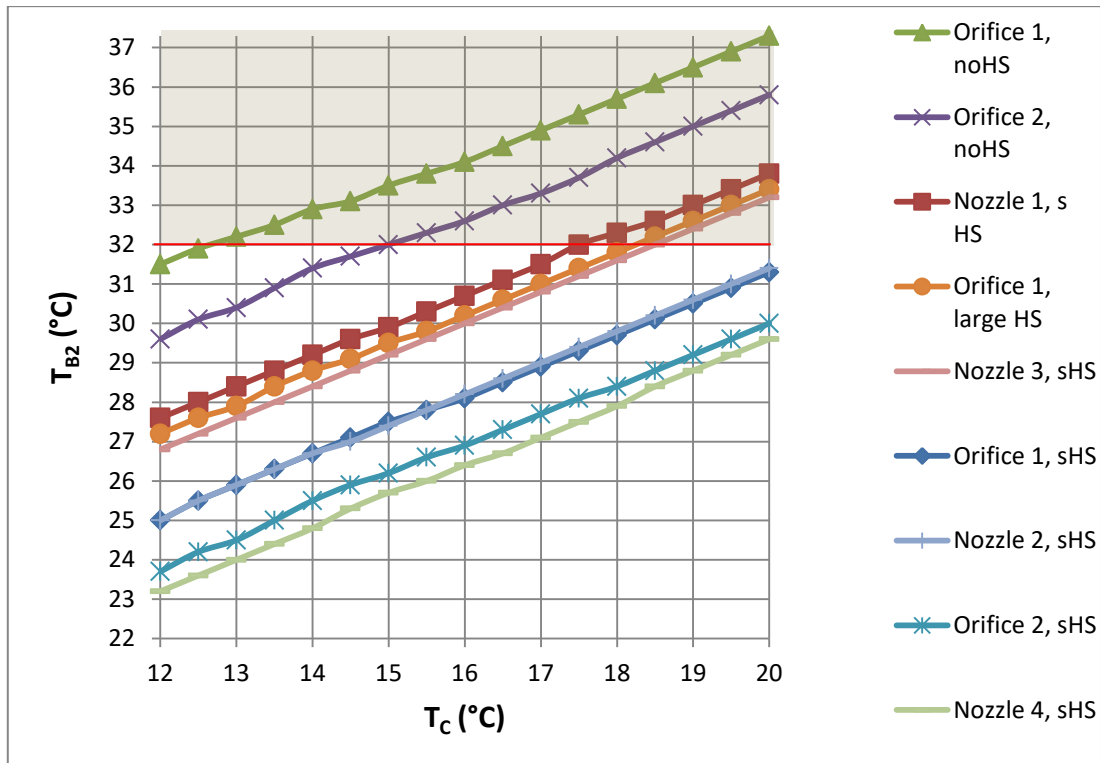


Figure 4.6. Variation de T_{B2} sur face 2 de la DB en fonction de la température de l'air convectif (T_C).

4.3.1.1 Discussion

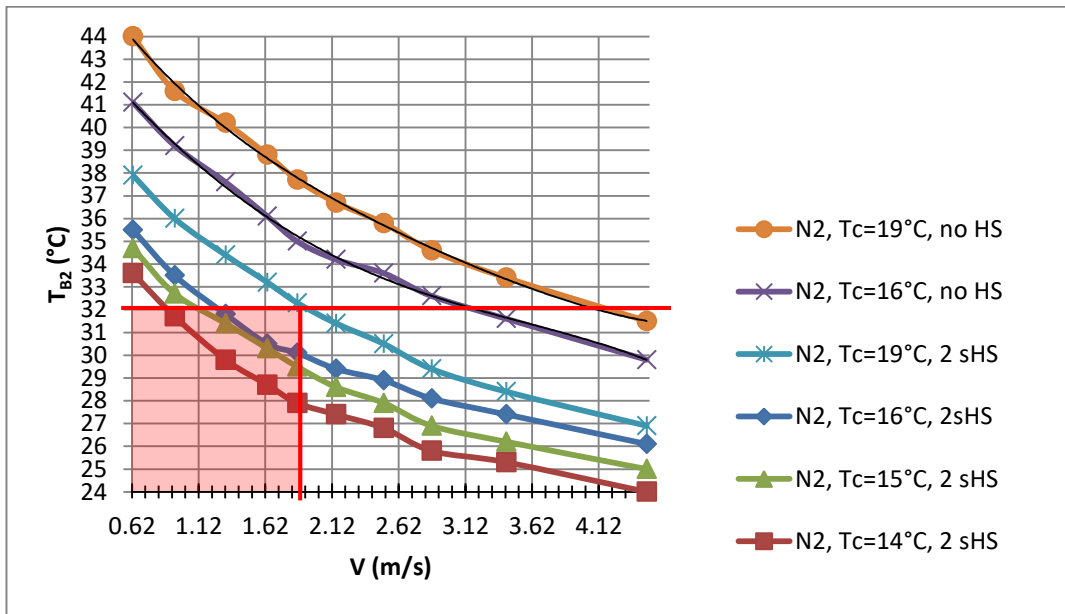
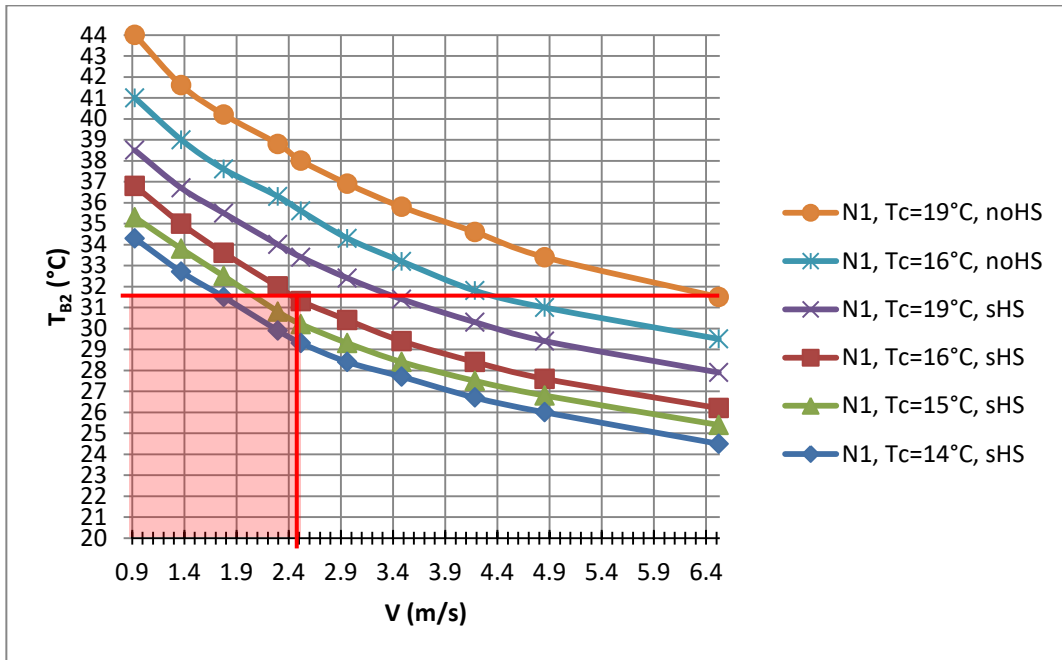
Tout en analysant les réponses de la figure 4.6, nous constatons que l'orifice 2 avec les radiateurs donne le meilleur rendement (la buse 4 est une variation de l'O2 avec une entrée d'air en forme V. Voir section 4.3.6 ci-bas). Nous notons ici deux facteurs importants qui ont contribué à ces résultats : la quantité de l'écoulement et l'interaction de l'air convectif avec la surface chaude. L'orifice 2 a la plus grande

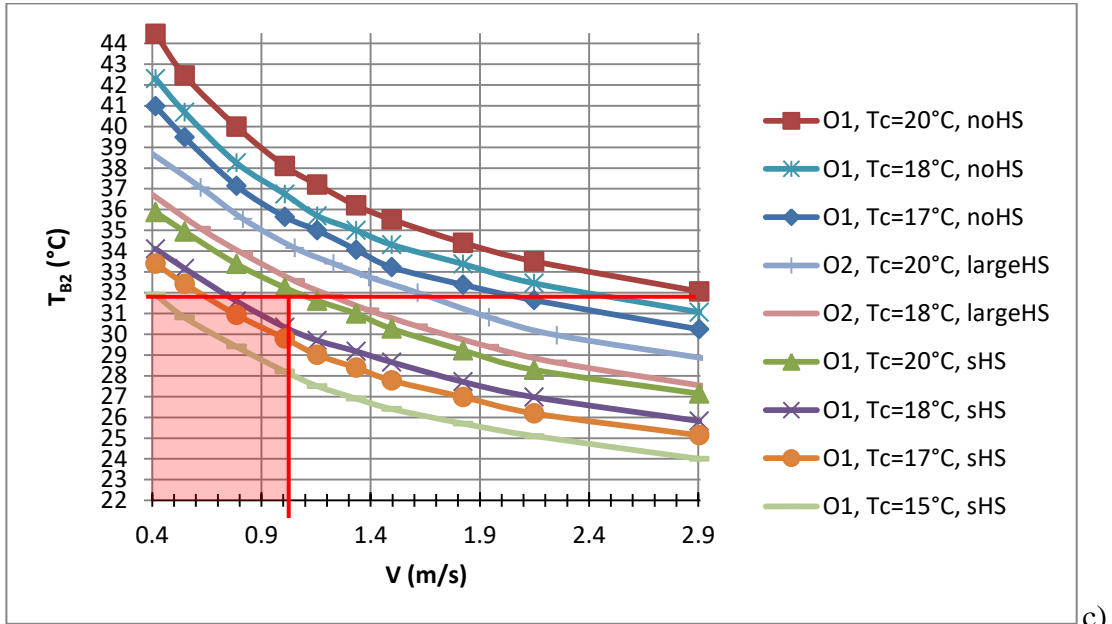
surface donc il offre le plus grand écoulement (4,35 SLPM). Mais sans l'utilisation des radiateurs, le rendement de l'O₂ est beaucoup plus faible, car la résistance convective entre les surfaces des ASICs et l'air convectif est grande (la courbe violette de la figure 4.6). Malgré l'utilisation des radiateurs, et une vitesse d'air convectif relativement élevée, la buse 1 a donné un rendement faible. Cela est à cause de l'écoulement insuffisant par rapport à la surface à refroidir (3.4 SLPM).

Toutes les réponses en bas de la ligne horizontale rouge à 32 °C sur la figure 4.6. Sont des réponses acceptables qui répondent aux exigences du cahier de charge (32 °C max).

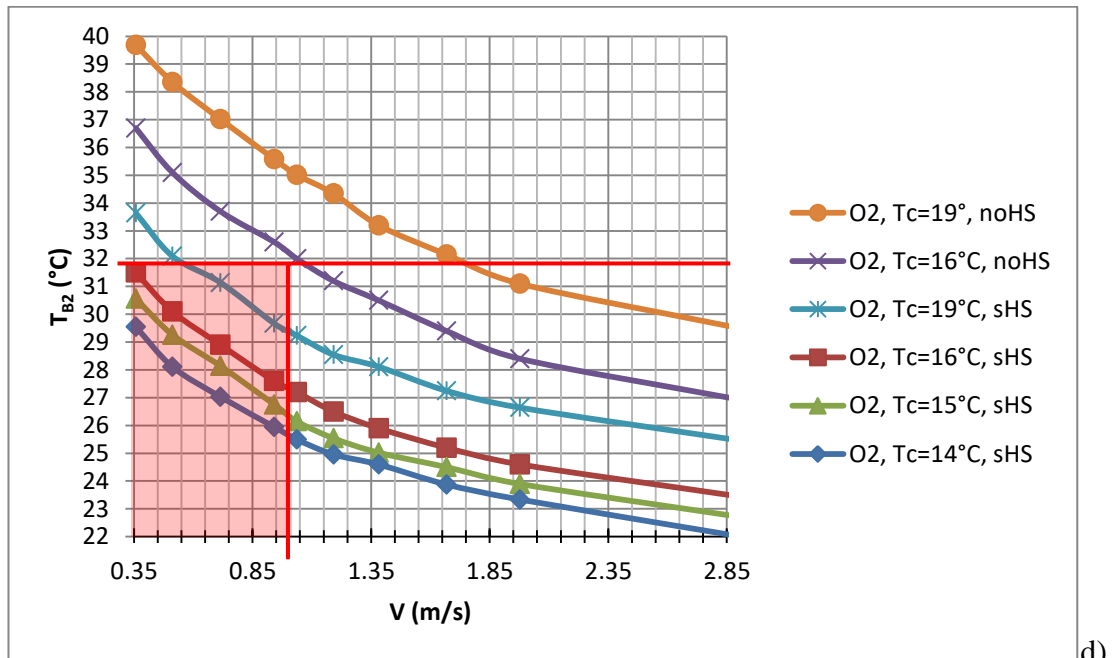
4.3.2 Mesure de l'effet de variation de la vitesse de l'air convectif

Pour cette expérience, nous avons mesuré la variation de la température T_{B2} en fonction de la température et de la vitesse de T_C , pour les buses et les orifices. Nous avons pris plusieurs séries de mesures avec et sans radiateurs sur les ASICs. Pour chaque série de mesures, nous avons gardé T_C et T_A constantes et nous avons varié P_S sur 10 étapes (de 11 à 132 Pa). Nous avons utilisé la caméra IR pour mesurer la température T_{B2} . La figure 4.7 montre les résultats de ces mesures, 4.7-a sont les mesures de la buse 1 (B1), 4.7-b sont les mesures de la buse 2 (B2), 4.7-c sont les mesures de l'orifice 1 (O1), et 4.7-d sont les mesures de l'orifice 2 (O2).





c)



d)

Figure 4.7. Séries de mesures de T_{B2} en fonction de la vitesse de T_C pour : a) la B1, avec un écoulement de 1,25 à 8,8 SLPM; b) la B2, avec un écoulement de 1,4 à 10 SLPM; c) l'O1, avec un écoulement de 1,4 à 9,8 SLPM; et d) l'O2 avec un écoulement de 1,5 à 1,2 SLPM.

Tous les résultats montrés à la figure 4.7 représentent un écoulement intérieur laminaire ($Re < 2000$). Ceci est important pour la stabilité thermique, car l'écoulement affecte l'homogénéité de l'échange thermique dans le temps. Le quadrant rouge sur les figures montre les portions des courbes de réponse qui respectent le cahier de charge. La ligne horizontale marque la limite de température maximale acceptable de 32 °C, et la ligne verticale marque la vitesse de l'air convectif à la sortie de la buse qui correspond à $P_S = 38$ Pa. Cette dernière est une valeur de pression très raisonnable pour un écoulement d'air laminaire. Elle a été choisie empiriquement tout en considérant plusieurs critères comme : l'efficacité et la consommation de la souffleuse à turbine, l'écoulement à la sortie de la buse, la température T_{B2} , l'écoulement total de toutes les cellules du scanner, le niveau de bruit dans le système, etc. Tous les résultats de la figure 4.7 montrent une meilleure efficacité thermique avec l'utilisation des radiateurs. Même si on peut arriver à plus bas que 32 °C sans radiateur, l'utilisation de ce dernier est très conseillée. Le radiateur augmente la capacité thermique de la surface de l'ASIC. Une plus grande capacité thermique donne une meilleure stabilité thermique contre les fluctuations thermiques de hautes fréquences (comme un filtre passe-bas thermique). Encore avec un radiateur, on obtient le même rendement, mais avec un débit plus bas. Donc une meilleure stabilité thermique avec un rendement énergétique plus efficace.

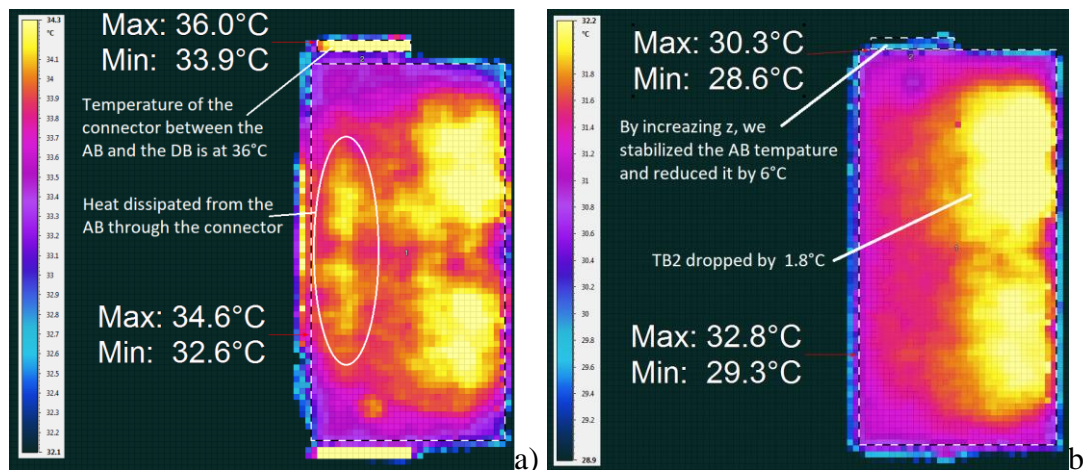
4.3.3 Problèmes et difficultés dans les prises de mesures

Durant le temps de prise de mesures, nous avons remarqué que les résultats de mesures thermiques n'étaient pas reproductibles. Dans plusieurs occasions, par exemple dans un intervalle d'un à quelques jours, il était impossible de répliquer les mêmes résultats pour exactement les mêmes mesures et les mêmes configurations. Nous obtenions toujours quelques degrés de décalages entre les anciens et les

nouvelles mesures (un décalage qui peut aller de 1 à 3 °C). Plusieurs paramètres peuvent influencer les mesures (comme les différents capteurs, les contrôleurs et actuateurs, ajustement des instruments de mesures, températures et convections, etc.). Il y a les fluctuations de la température ambiante durant les mesures. Lorsque le climatiseur ou le chauffage s'allume. Il peut causer des fluctuations de 1 à 4 °C de la température ambiante. Pour minimiser l'effet de cette fluctuation sur nos mesures. Nous avons tenté de prendre les mesures en dehors des cycles d'allumages du chauffage ou climatiseur aussi que possibles. Et d'assurer que le montage de l'expérience n'est pas dans le champ direct d'une sortie de courant d'air de chauffage ou de climatisation. Nous avons refait les mesures à plusieurs reprises, mais elle était vraiment difficile de valider les résultats. Dans l'une de nos mesures de stabilité thermiques sur la DB-face 2, la température de cette dernière a décalé de 30,1 à 32,3 °C tous en ajustant la distance caractéristique z entre la surface et la sortie de l'orifice. Au début nous avons pensé que c'est le paramètre z qui cause ce décalage, mais avec la répétition. Nous avons remarqué que ce décalage n'était pas tout à fait reproductible et il semblait qu'il est dépendant d'autre paramètre. Après une vérification de la consommation d'énergie électrique dans le circuit du scanneur, nous avons remarqué qu'une paire d'AB et de DB consomme proche de 2,5 W, tandis que les deux ASICs d'une DB ne devraient consommer plus que 1,2 Watt. Comme nous l'avions mentionné au chapitre 3 à la section 3.6.3, il y a deux petites CI sur l'AD (proche du connecteur qui relie l'AB avec la DB).qui dissipent une quantité de chaleur non négligeable (85 à 95 °C). La figure 3.12 montre l'image thermique de la zone en question, donc l'emplacement et l'influence de ces sources sur la DB. L'emplacement de ces sources (CI) est caché entre chaque deux AB adjacentes et il n'est pas détectable par la caméra IR. Donc pour prendre la photo thermique de la figure 3.12, nous avons séparé une AB de la RB, et l'avions alimenté d'une source externe. Encore, il faut que la DB soit connectée à l'AB pour activer ces sources de chaleur. Durant nos investigations, nous avons encore observé une dépendance entre la consommation d'énergie des ASICs et la variation de température de ces deux

composants. Il semblait que ces derniers contrôlent l'alimentation en énergie des ASICs.

Nous avons résolu ce problème de stabilité thermique tout en augmentant la distance caractéristique z à 30 mm. Cette augmentation a assuré que l'air convectif sortant de l'orifice couvre la partie inférieure de l'AB. La figure 4.10-a montre l'influence de ces sources de chaleur sur la DB-face 2, et en 4.10-b l'effet de l'ajustement de z sur T_{B2} . Après ces ajustements, on remarque que la température du connecteur a été réduite de 6 °C. Ces résultats ont été obtenus avec l'orifice 2, $P_S = 38$ Pa, $T_{air} = T_A = 21,7$ °C. Nos dernières mesures montrent que le problème de la reproductibilité des résultats a été résolu avec ces ajustements.



4.3.4 Mesure de la stabilité thermique de la température T_{B2}

Le but de cette expérience est de savoir sous quelles conditions la stabilité thermique (de $\pm 2\%$) sur les PDA qui est renforcée par le cahier de charge pourrait être respectée. Donc, cette expérience est composée de deux parties dans lesquelles nous avons étudié la stabilité thermique de T_{B2} . Nous avons utilisé le montage d'une

DB et de l'orifice 2 avec $z = 30$ mm, et des paramètres convectifs et environnementaux constants. Dans la partie 1, nous avons comparé les résultats de la stabilité de trois montages de DB : sans radiateurs, avec radiateur de type 1 (le grand radiateur pour les deux ASICs) et avec radiateurs de types 2 (un petit radiateur sur chaque ASIC). Même chose pour la partie 2. Mais dans cette dernière, nous avons mesuré les limites de la stabilité face à une variation de charge (P_D) de la DB . Donc la partie 1 mesure le total des fluctuations dynamiques sur la réponse en état permanent. Plusieurs facteurs pourraient contribuer à ces fluctuations comme des perturbations dans l'air convectif sur les surfaces, fluctuations ou bruit sur les signaux électriques, énergie thermique radiée des autres sources dans le champ de vue, etc. Dans la partie 2, nous avons ajouté la perturbation due à la variation de P_D causée par le basculement d'un seul ASIC de mode veille en mode détection (ajout de 0,05 W), ou le basculement des deux ASICs en même temps (0,1 W). Ces résultats sont combinés avec les résultats de la partie 1, offrent une information sur la fluctuation maximale de la température T_{B2} .

Pour toutes les mesures, nous avons utilisé la caméra IR pour mesurer les valeurs absolues de T_{B2} . Pour la résolution de mesures de la température absolue, nous sommes limités à la résolution maximale de la caméra IR égale à 0,1 °C. Mais l'avantage de cette méthode est au niveau du temps de réponse rapide qui est en ordre de quelques millisecondes. Un tel petit temps de réponse va permettre de détecter les fluctuations à haute fréquence sur la totalité de la surface visée. Ce qui est très important pour la validité de cette expérience.

Le tableau 4.2 montre les résultats de la partie 1 avec l'orifice 2, $T_A = 20$ °C, $T_{air} = 18$ °C, $V_{air} = 0,95$ m/s, et $P_S = 45$ Pa. Nous allons garder ces mêmes paramètres pour les mesures de la partie 2.

Tableau 4.2 Comparaison de la stabilité thermique avec et sans radiateurs.

	T_{B2} (°C)			
	min	mean	max	$\pm dT$
No HS	34,2	34,4	34,6	0,20
Type 2 HS (2 small)	28,3	28,4	28,5	0,10
Type 1 HS (one large)	30,5	30,6	30,6	0,05

Et le tableau 4.3 montre les résultats de mesure de la partie 2. Pour augmenter P_D , nous avons augmenté légèrement d'une façon très contrôlable la tension d'alimentation de l'AB et de la DB. La valeur de variation de P_D est le produit de la variation de courant et de la tension qui alimentent l'AB et la DB.

Tableau 4.3 Comparaison de la stabilité thermique avec et sans radiateurs avec l'augmentation de P_D .

	T_{B2} (°C)				dT_{Tot} (°C)	dT_{Tot} (%)
	0,00(W)	0,05 (W)	0.10 (W)	dT (°C)		
No HS	34,4	34,8	35,1	0,70	0,90	2,60
Type 2 HS	28,4	28,6	28,9	0,50	0,60	2,10
Type 1 HS	30,5	30,8	31,1	0,60	0.65	2,10

4.3.5 Analyse et discussion

Les résultats montrent une meilleure stabilité thermique avec les radiateurs. Et que les radiateurs de type 2 donnent une meilleure efficacité thermique que le type 1. En ajoutant un radiateur sur le boîtier de l'ASIC, on augmente le pourcentage de P_D dissipé par ce dernier. En conséquence, on réduit le pourcentage de P_D dans le PCB, dont le pourcentage de fluctuation de T_{B2} . Ces mesures ont été effectuées sur la DB-face 2 pour le pire cas. Le pire cas est quand les deux ASICs se basculent dans le mode de détection définitivement. En pratique, cet événement est très extrême et sa probabilité de se produire est presque nulle. Lorsqu'un pixel détecte une radiation, l'ASIC respectif se bascule en mode de détection pour une très petite période de

temps (en ns) juste assez pour traiter les données de cette détection. Par la suite, l'ASIC revient en mode de veille. Durant un cycle de détection, la détection des événements dans le temps par un ASIC et la variation de la température sur la DB respectent une distribution de Poisson. Cette distribution a : une $\lambda = 4$, une température initiale avec probabilité de zéro (c'est la température avant que l'ASIC effectue la première détection, donc la plus petite valeur à l'extrême gauche de la courbe), et la température maximale qui a une probabilité presque nulle (c'est l'augmentation de 2,1% de la température initiale à l'extrême droite de la courbe sur l'axe des x). Le cahier de charge exige une stabilité de 2,0% sur les PDAs. Nos mesures montrent une variation maximale de 2,1% sur la DB-face 2. Sur cette face, les pixels du détecteur TEP sont installés. Et (comme nous avons vu au chapitre 1) un tampon en céramique va séparer les pixels de la DB-face 2. Donc en ajoutant le tampon, la carte PCB qui supporte les PDA, et les cristaux sur les PDA, nous estimons que cette variation de 2,1% va être atténuée par un grand facteur et dont par les résistances et les capacitances thermiques non négligeables des matériaux qu'on ajoute sur la DB-face 2.

4.3.6 Système de compensation thermique

Comme mesures supplémentaires de stabilisations, nous proposons l'ajout d'un système de compensation thermique externe pour compenser la variation thermique sur les DBs. Idéalement, une telle compensation supposée être incluse dans chaque ASIC (niveau 0 de la conception et de la gestion thermique). Mais une telle solution n'a pas été considérée lors de la conception de ce dernier. Le principe ici est de manipuler localement la température de l'air convectif dans chaque cellule. Le but de cette manipulation est de réduire le pourcentage de variation de dT due au changement de mode de l'ASIC. Donc nous avons ajouté dans chaque orifice (orifice 2) un petit élément chauffant. Cet élément va être toujours actif lorsque l'un ou les deux ASICs sont en mode veille. En mode actif, l'élément va produire une puissance

de compensation P_{CD} . Nous avons ajusté empiriquement cette dernière pour produire une T_{B2} équivalente à un ASIC en mode de détection. Donc, si l'un des deux ASICs change son état de veille à détection (augmentation de P_D de 0,05 W), il va fournir un signal pour désactiver P_{CD} . Nos mesures montrent une réduction du pourcentage d'erreur à proche de 0,0%. Si les deux ASICs de la DB changent leurs états simultanément (augmentation de P_D de 0,1 W), l'erreur sera réduite à proche de 50%. La figure 4.9 montre le montage d'une cellule. Nous avons créé une cavité (forme V) sur le coup de l'orifice (entre la chambre à compression et l'orifice) qui contient l'élément chauffant. Nous avons utilisé le même MOSFET que dans le chapitre 3 comme élément chauffant.

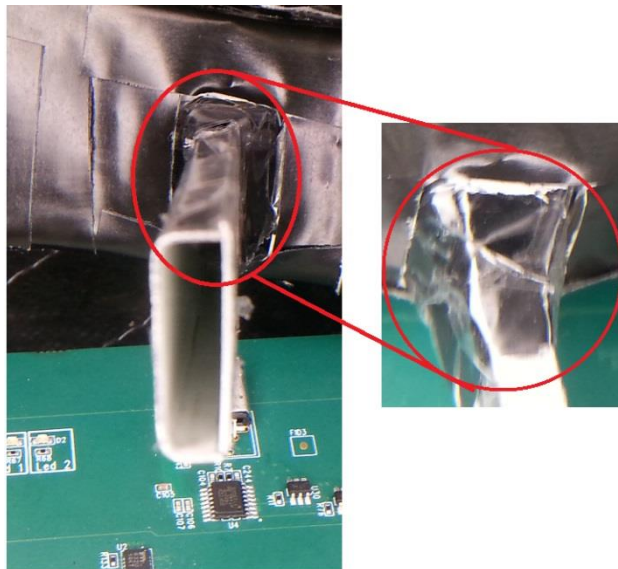


Figure 4.9 L'orifice 2 et l'ajout d'un élément de compensation thermique sur le cou de l'orifice. La photo de droite montre la cavité qui contient l'élément.

4.4 CONCEPTION ET SPÉCIFICATIONS DE LA CAI

D'après cette étude détaillée dans ce chapitre, nous avons finalisé la conception et les spécifications de la CAI. Toutes ces spécifications, ne doivent pas avoir une signification statistique importante. De même, Il faut respecter le cahier de

charge et les conditions environnementales d'utilisation comme : les borne de la température ambiante, le taux d'humidité, le point de rosé, et la pression atmosphérique.

Nous proposons l'utilisation de l'orifice 2 avec $z = 30$ mm, et deux radiateurs de type 2 pour chaque cellule. Cette configuration va permettre de refroidir la partie chaude de l'AB en même temps que les ASICs et la DB-face 1.

La température de l'air convectif (T_c) doit être stabilisée à 16 °C. L'air convectif doit circuler dans une configuration à boucle fermée dans la cavité du scanner. Pour un $T_c = 16$ °C, avec un taux d'humidité maximal $H = 60\%$ de l'air ambiant. Si H dépasse le 60% , disons 80% , cela ne va pas affecter l'intérieur de la cavité du scanner. Nos mesures montrent un $H = 20\%$ dans le scanner donc pas de risque de condensation. Maintenant sur la structure externe du scanner il faut considérer le contact de cette dernière avec l'air ambiant. Avec un $H = 80\%$ de l'air ambiant, le point de rosée sur la structure externe du scanner est estimé à 18 °C [130]. Supposons que la structure externe du scanner a la même température que l'air convectif à l'intérieur. Cela signifie que si la température ambiante dépasse 18 °C, l'eau va se condenser sur la structure externe du scanner. Si on baisse H à 60% , le point de rosée monte à autour de 23 °C. Donc, pour réduire le risque de condensation, d'eau, nous conseillons d'isoler thermiquement et acoustiquement les murs externes de la cavité du scanner. Cette isolation va assurer un contrôle efficace de la condensation d'eau sur les surfaces, et en même temps le niveau de bruit émis par les souffleuses d'air à turbine dans la cavité du scanner.

La pression statique P_s dans la chambre de compression doit être maintenue à 38 Pa. Une telle pression va livrer un écoulement $E = 4,35$ SLPM et une vitesse $V = 1,05$ m/s à la sortie de l'orifice. Le scanner comporte un total de 288 orifices, donc un écoulement total $E_{tot} = 1253$ SLPM.

Nous conseillons l'utilisation de deux souffleuses à turbine de type 9BMB12P2K01, la figure 4.10 montre la réponse de la pression statique en fonction de l'écoulement [131]. Les deux souffleuses opérées à autour de 30% chaque de sa capacité totale offre la pression et l'écoulement nécessaire ($E_{tot} = 1253$ SLPM et $P_S = 38$ PA). Les souffleuses seront ajustées d'une façon empirique et contrôlées par un contrôleur PID pour compenser tout changement de P_S . Un capteur de pression SDP816-125PA doit être installé dans la chambre de compression pour fournir de l'information en temps réel au contrôleur sur l'état de P_S .

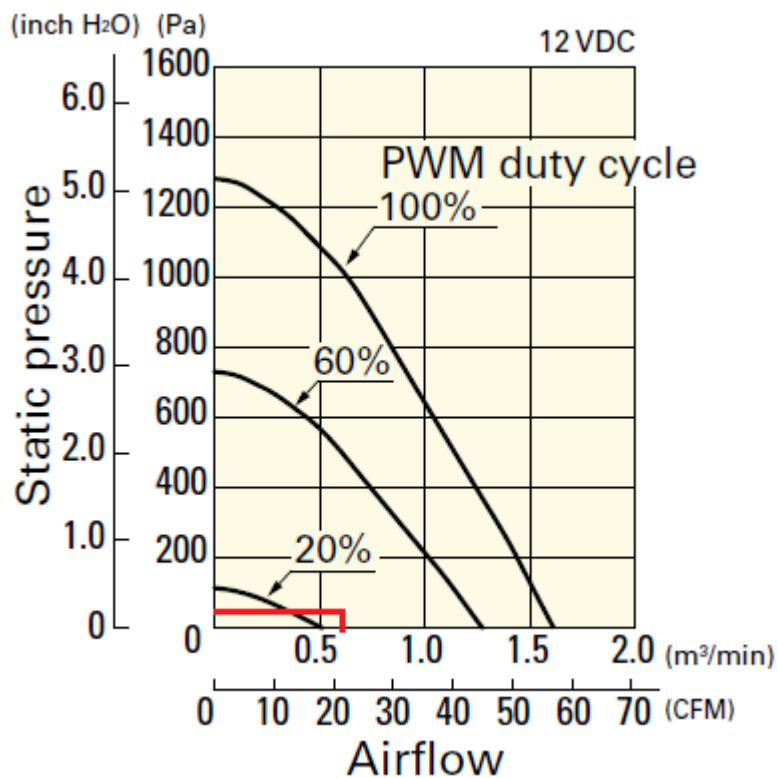


Figure 4.10 La réponse de la pression statique en fonction de l'écoulement de la souffeuse de type 9BMB12P2K01, le traçage en rouge montre le fonctionnement à 30% avec $P_S = 38$ Pa, pour un $E = 627$ SLPM ($E_{tot} = 1253$ SLPM pour deux souffleuses)

4.4.1 Mesure de niveau de bruit sonore

Nous avons utilisé un dB-mètre pour estimer le niveau de bruit sonore émis par le système de refroidissement. Le dB-mètre est placé approximativement à une distance de 1 mètre de la source de bruit.

Nous avons opéré une souffleuse de type 9BMB12P2K01 de 20% à 100% de sa capacité, et nous avons mesuré la pression du son « Sound pressure level » (SPL). Nous avons mesuré un SPL de 41 à 66 dBA (de 20 à 100% respectivement de la capacité de la souffleuse). À 30% nous avons obtenu un SPL = 54 dBA.

Maintenant, nous avons répété la même mesure, mais avec les conditions suivantes : nous avons confiné la souffleuse dans une boîte en bois. Cette boîte est bien scellée sauf pour deux ouvertures d'entrée et de sortie de l'air, nous avons connecté un tuyau entre ces deux ouvertures (pour une circulation d'air à boucle fermée). Ces conditions de mesures vont aider à estimer le niveau de bruit produit par le système dans le scanner, à une distance de 1 mètre du scanner.

Nous avons mesuré un SPL = 50 dBA (à 30% de capacité), et de 57 dBA (à 100% de capacité). Donc avec deux souffleuses dans le système, nous estimons un niveau de bruit d'opération normale, SPL(moyen) = 53 dBA, et un SPL(maximal) = 60 dBA.

4.4.2 Configuration finale de la CAI

Deux échangeurs thermiques de type CC3065PHL de Noren [132] sont installés de chaque côté du boîtier du scanner. Ces échangeurs vont échanger l'énergie thermique entre l'air convectif à l'intérieur du scanner et un système de refroidissement et de stabilisation à l'eau à plaques froides (à l'extérieur du scanner). Ce dernier est de type TF1400 de ThermoFisher scientificTM [133] et il offre une

stabilisation de $\pm 0,1\%$. Le TF1400 est ajusté pour offrir un air convectif à température stable de $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ à l'intérieur du scanneur. Les deux souffleuses de type 9BMB12P2K01 vont pousser l'air (une souffleuse pour chaque CC3065PHL, l'air froid sera poussé de la partie haute de chaque échangeur) dans un conduit (chambre de compression principale) vers des chambres de compression secondaires (un total de 36 chambres secondaires) chaque chambre de compression secondaire livre de l'air froid pour 8 cellules. L'air de sortie des cellules va refroidir le reste des cartes du scanneur (surtout le FPGA sur chaque RB) et il est récupéré dans la partie inférieure de chacun des deux échangeurs (partie inférieure de chaque côté de la cavité interne du scanneur).

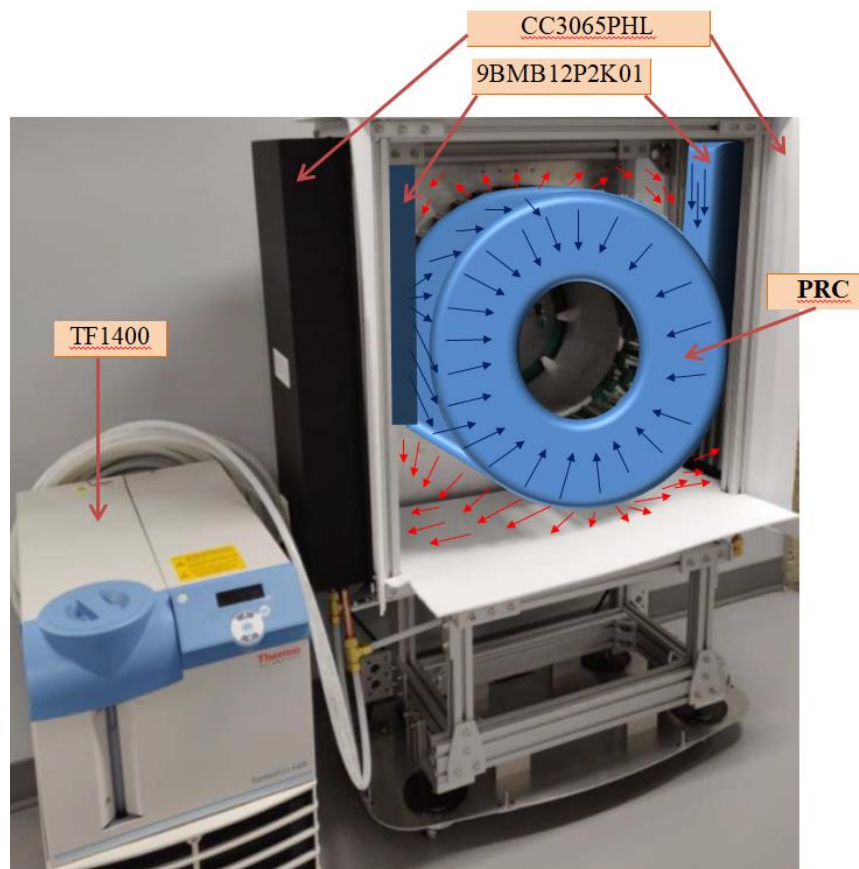


Figure 4.11 La configuration finale de la CAI sur le scanneur LabPET II.

CHAPITRE 5

CONCLUSION ET TRAVAUX

FUTURS

5.1 CONCLUSION

Nous avons traité dans cette thèse la problématique reliée à la stabilité thermique dans le scanner préclinique nouvelle génération LabPET II.

Nous avons introduit la problématique reliée à la surchauffe et à la stabilité thermique dans les DBs du scanner. Donc, la régulation de la température de ce dernier est très essentielle au bon fonctionnement du scanner qui est basé sur la technique de détection TEP-PDA (chapitre 1). Par la suite, nous avons effectué une revue de la littérature et de l'état de l'art (chapitres 2) qui couvrent suffisamment le sujet principal et les techniques de mesure et d'analyse que nous avons servis dans le cadre de cette thèse.

Nous avons montré une méthodologie innovatrice qui est basée principalement sur la thermographie IR pour faire la caractérisation thermique de la carte DB du scanner (Chapitre 3). Nous avons servi des méthodes empiriques et analytiques pour obtenir nos résultats. Ces résultats ont montré qu'une convection forcée et dirigée pourrait être utilisée pour refroidir et contrôler la température des détecteurs TEP à moins de 32 °C, avec une stabilité thermique de moins de 2%. Un petit radiateur sur chaque ASIC sera un atout pour améliorer l'efficacité énergétique du système.

Le chapitre 4 a été consacré pour la calibration des paramètres et l'optimisation des résultats de la CAI. Un système externe de stabilisation thermique à l'eau, combiné avec un système CAI interne à l'air. Nous avons manipulé plusieurs paramètres comme : la vitesse et la température de l'air convectif, la forme de la buse et le débit de l'air, la surface d'impact (avec ou sans radiateur). Nous avons obtenu des résultats satisfaisants avec un orifice rectangulaire, un radiateur sur chaque ASIC,

avec un petit nombre Reynolds (écoulement laminaire $R < 2000$) et une température d'air convectif de 16 °C.

Nous avons défini les spécifications techniques, tous matériels et matériaux nécessaires pour construire le système de la CAI spécifique au scanneur LabPET II. Et finalement, nous avons monté la configuration finale du système installé sur le scanneur.

5.2 TRAVAUX FUTURS

Le travail présenté dans le cadre cette thèse est une étape importante que nous avons franchie pour introduire nos méthodes de caractérisations et d'analyse thermiques à un nouveau niveau. Dans des applications modernes comme LabPET II, nous croyons qu'il existe une lacune dans la caractérisation et la quantification de problèmes thermiques au niveau de systèmes dans un environnement d'application réel. Donc, l'utilisation de telles approches que nous avons présentées dans cette thèse est incontournable. Ce n'est que le point de départ pour ces méthodes innovatrices.

Dans nos travaux futurs, nous allons étendre nos méthodes de caractérisation et de quantification spatiales et discrètes de problèmes thermiques pour couvrir les domaines de semiconducteur et de l'électronique en général. Nous allons pousser plus profondément pour développer et standardiser ces techniques de mesure thermographiques IR. Nous allons encore étendre les champs d'applications de ces méthodes dans d'autres domaines et industries.

Dans le chapitre 4, nous avons introduit la CAI sur mesure pour le projet LabPET II. Cette méthode a été optimisée tout en utilisant des approches multidisciplinaires en milieu industriel très compétitif. Donc ce n'est pas juste la CAI

comme telle, mais plutôt l'expérience et les compétences que nous avons acquises en conjonction avec nos savoir-faire que nous allons servir pour nos futurs travaux. Prochainement, nous allons combiner la CAI avec des méthodes de contrôles distribuées pour améliorer la résolution de contrôle spatiale et temporelle (approches et méthodes dynamiques). Encore, nous allons essayer d'améliorer la stabilité de la CAI tout en introduisant d'autres variables ou éléments de stabilisations dans la CAI, comme les MCPs.

* * * * *

ANNEXE

Annexe (a) Publications dans le cadre de mes études de PhD

- 1- R. Espagnet, M. Sayde, L. Arpin, J.-F. Beaudoin, A. Lakhssassi, R. Lecomte, and R. Fontaine, « Thermal Management Solutions for the LabPET II Scanner Dedicated to Mid-size Animals », Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 26 October - 2 November 2019, Manchester, UK.
- 2- A. Lakhssassi, R. Palenychka, Y. Savaria, M. Sayde, and M. Zaremba, "Monitoring Thermal Stress in Wafer-Scale Integrated Circuits by the Attentive Vision Method Using an Infrared Camera," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 26, pp. 412-424, 2016.
- 3- M. Saydé, A. Lakhssassi, E. Kengne, and R. Palenichka, "A spatiotemporal signal processing technique for wafer-scale IC thermomechanical stress monitoring by an infrared camera," Journal of Biosciences and Medicines, vol. 1, p. 1, 2013.
- 4- A. Lakhssassi, R. Palenychka, M. Saydé, Y. Savaria, M. Zaremba, and E. Kengne, "A spatiotemporal attention operator for monitoring thermo-mechanical stress in wafer-scale integrated circuits using an infrared camera," in 2013 8th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA), 2013, pp. 165-170.

Annexe (b) Articles en cours de préparation

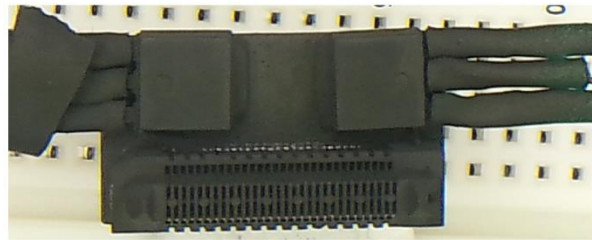
- 1- Spatial Thermal Characterizations by IR Thermography of a multilayers PCB with multiple heat sources – case study LabPET II detector board.

- 2- Thermal Stabilization by Cellular Air Impingement of a PET scanner detectors– case study LabPET II, a small to medium size preclinical animal scanner.

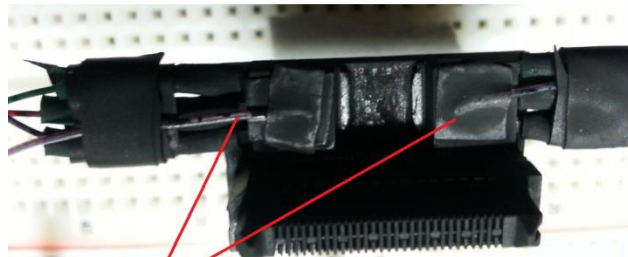
- 3- Thermal Management Solutions for the LabPET II Scanner Dedicated to Mid-size Animals.

Annexe (C) Photos de quelques configurations d'expérimentations

C.1 Configuration de la mesure thermique (mesures avec camera IR)

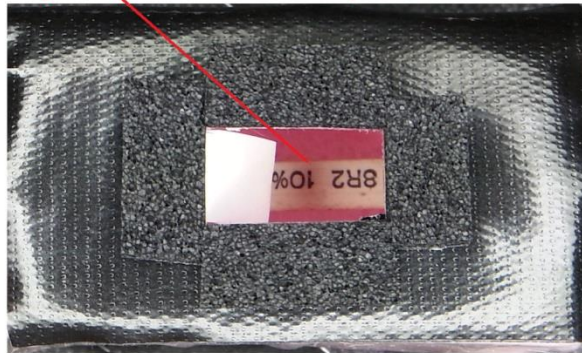


Avant d'ajouter les thermocouples

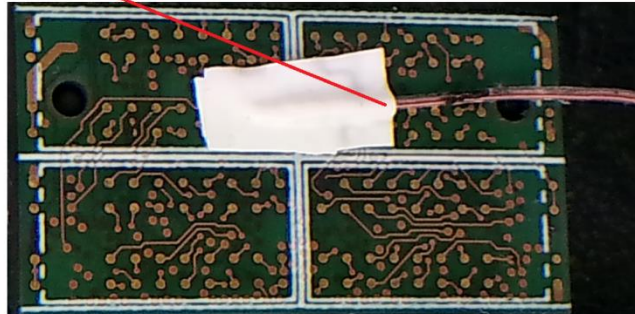


Les thermocouple installés sur les boîtiers

Heating element inside the oven(8.2 Ohms - 25W ceramic)

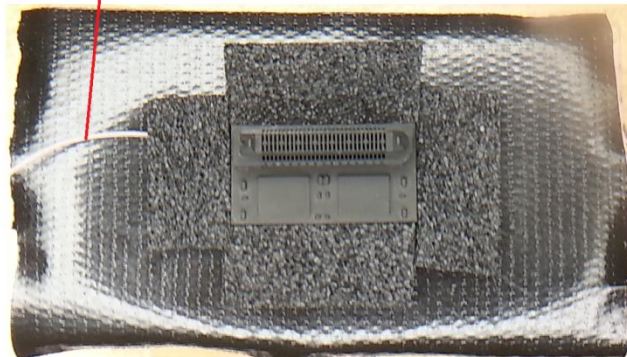


Thermocouple on DB-Face 2 for oven measurement

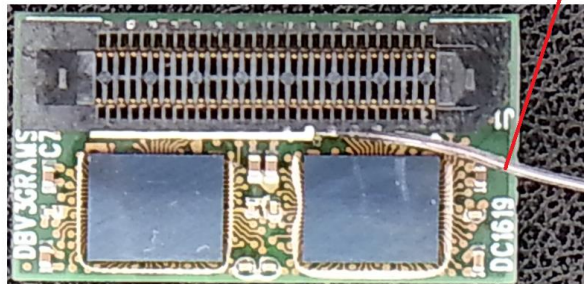


Thermocouple

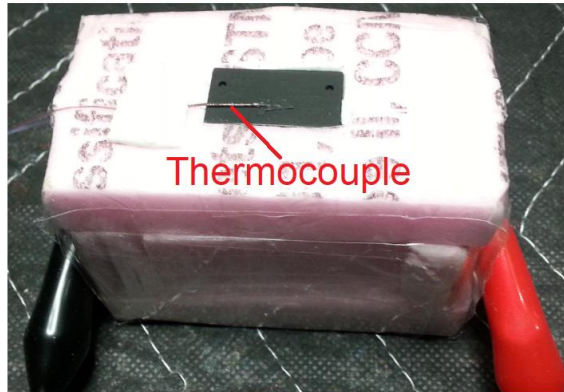
TB-face 2 inside the oven



Preparation for oven measurement
Thermocouple on DB-face 1 for oven



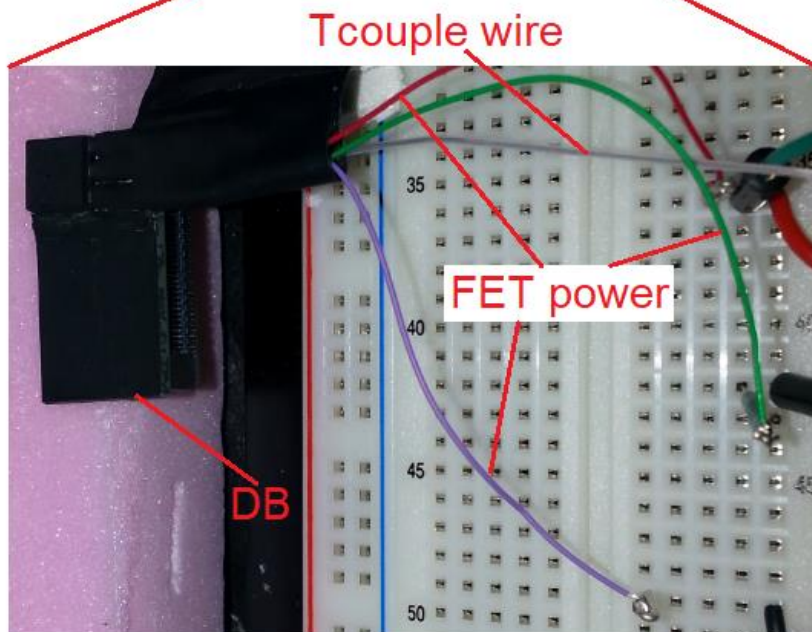
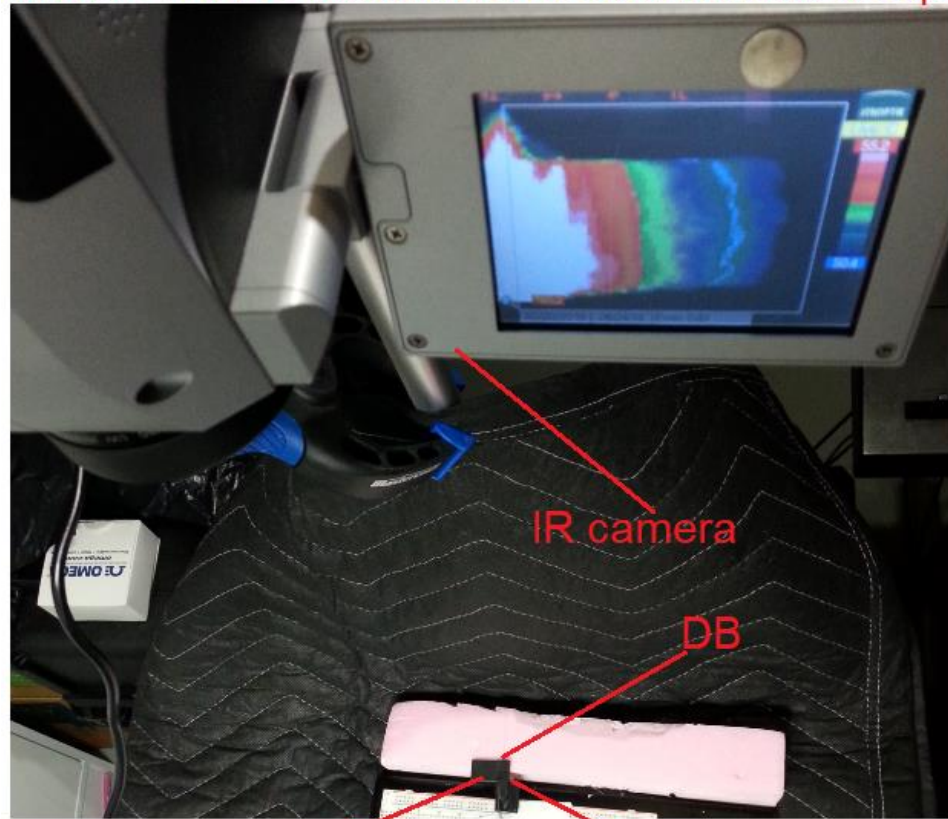
DB-face 2 setup in oven for emissivity adjustment



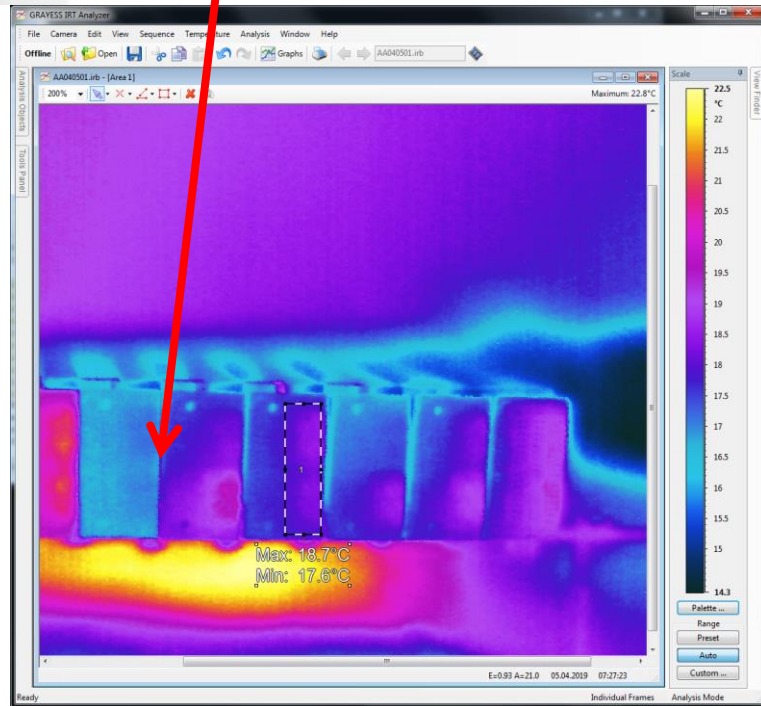
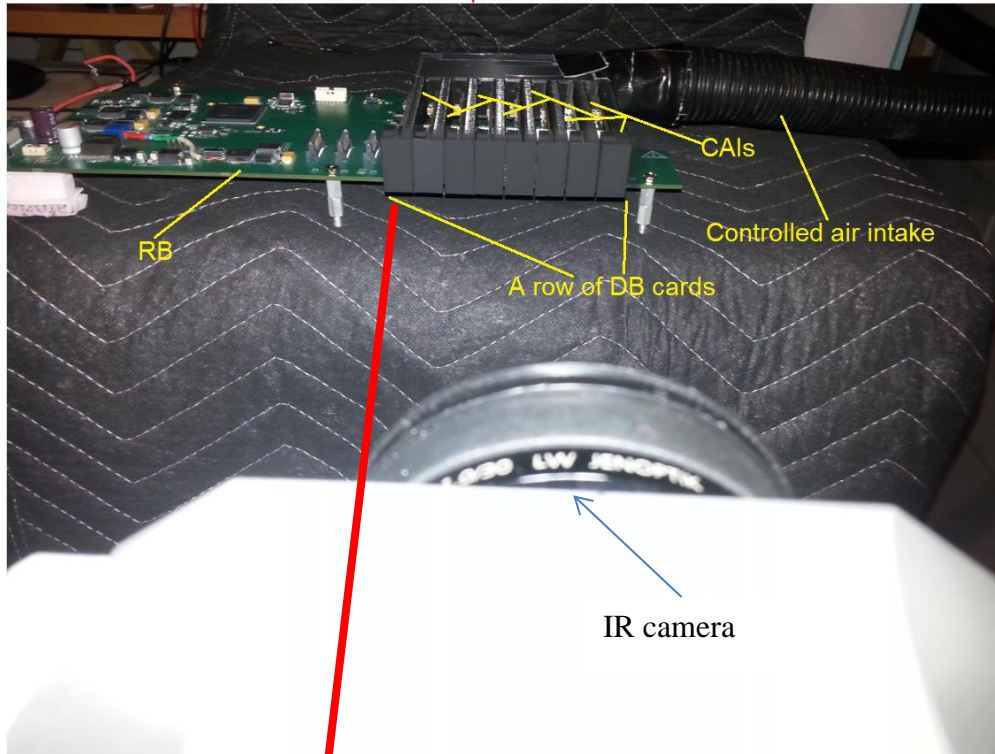
Oven IR camera setup



MOSFETs DB IR camera measurements setup

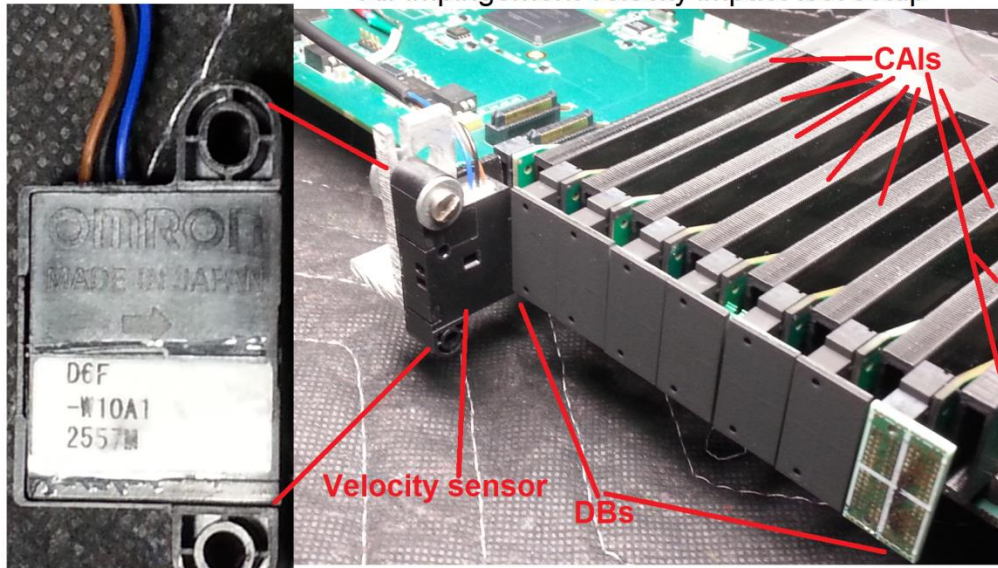


IR camera measurements setup for ASICs and convections

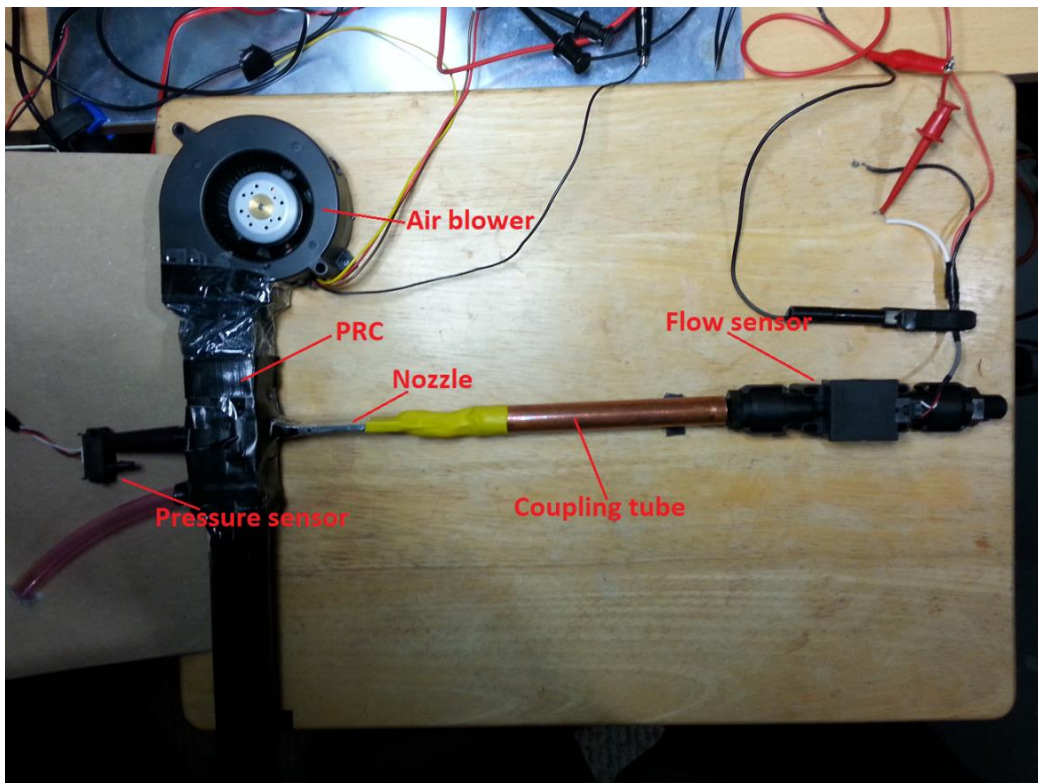


A simple of raw IR convection measurement of the setup over Analyser 7™

Air impingement velocity impact test setup



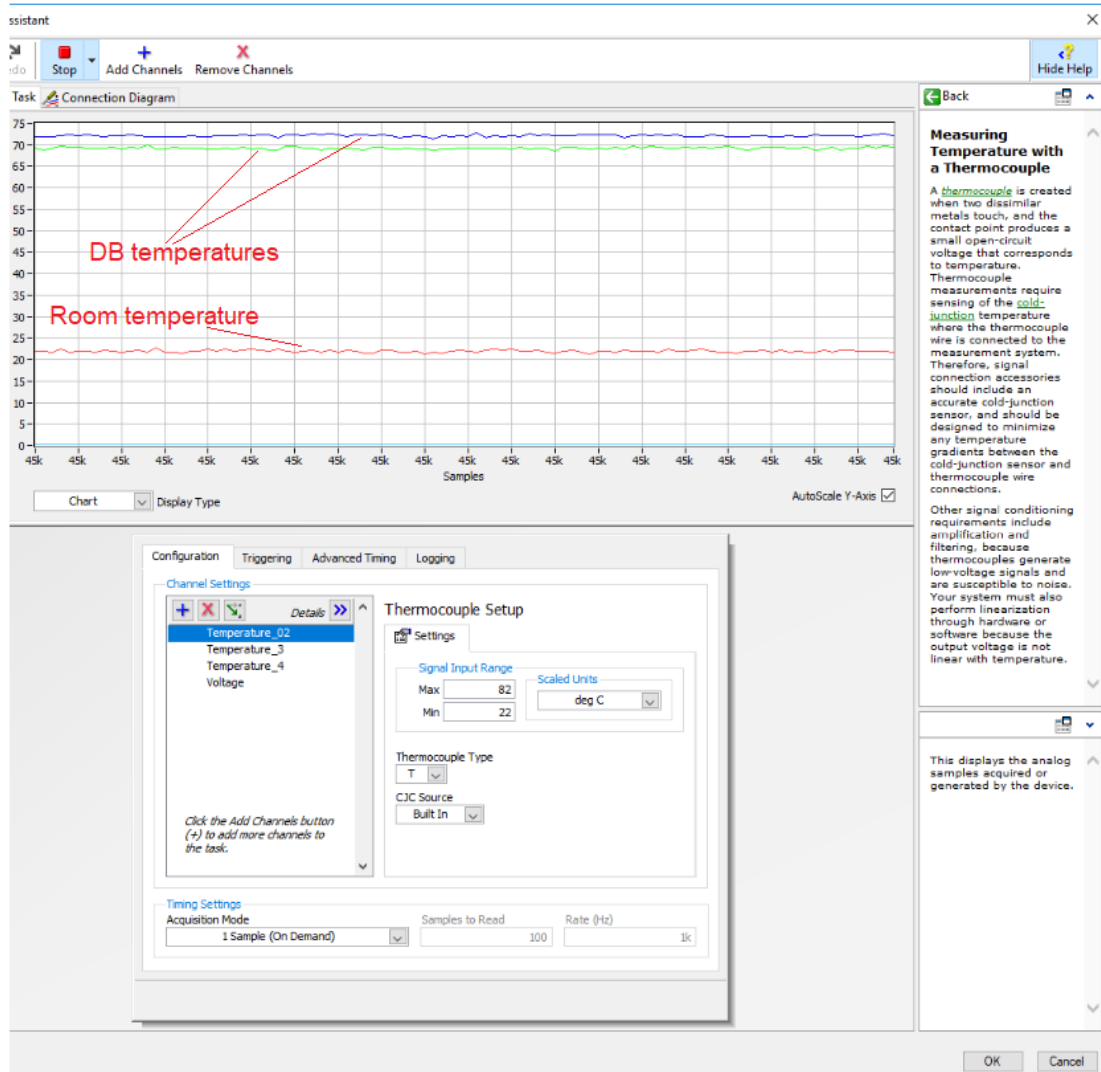
Flow-to-pressure calibration circuit setup



C.2 Application de la peinture thermique



C.3 Configuration de la lecture des thermocouples sur NI MAX



BIBLIOGRAPHIE

- [1] RENESAS. (2018, 20-10). *Heat-dissipation Mechanism*. Available: <https://www.renesas.com/sg/en/support/technical-resources/packaging/characteristic/heat-dissipation.html>
- [2] UQO. (2018, 12-05). *LIMA – Laboratoire d'Ingénierie des Microsystèmes Avancés*. Available: <http://w3.uqo.ca/limauqo/wordpress/>
- [3] Usherbrooke. (2019, 05-12). *Institut interdisciplinaire d'innovation technologique - 3IT, Groupe de recherche en appareillage médical de Sherbrooke*. Available: <https://www.usherbrooke.ca/grams/fr/>
- [4] Usherbrooke. (2019, 05-12). *Faculté de médecine et des sciences de la santé, Centre d'imagerie moléculaire de Sherbrooke (CIMS)*. Available: <https://www.usherbrooke.ca/dep-medecine-nucleaire-radiobiologie/departement/centre-dimagerie-moleculaire-de-sherbrooke-cims/>
- [5] R. Fontaine, F. Belanger, N. Viscogliosi, H. Semmaoui, M. A. Tetrault, J. B. Michaud, *et al.*, "The Hardware and Signal Processing Architecture of LabPET™, a Small Animal APD-Based Digital PET Scanner," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 3-9, 2009.
- [6] W. W. Moses, "Fundamental Limits of Spatial Resolution in PET," *Nuclear instruments & methods in physics research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, vol. 648 Supplement 1, pp. S236-S240, 2011.
- [7] T. Ido, C. N. Wan, V. Casella, J. S. Fowler, A. P. Wolf, M. Reivich, *et al.*, "Labeled 2-deoxy-D-glucose analogs. 18F-labeled 2-deoxy-2-fluoro-D-glucose, 2-deoxy-2-fluoro-D-mannose and 14C-2-deoxy-2-fluoro-D-glucose," *Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals*, vol. 14, pp. 175-183, 1978.
- [8] O. de Dreuille, P. Maszelin, H. Foehrenbach, G. Bonardel, and J. F. Gaillard, "Principe et technique de la tomographie par émission de positons (TEP)," *EMC - Radiologie*, vol. 1, pp. 2-35, 2/ 2004.
- [9] T. G. Turkington, "Introduction to PET instrumentation," *Journal of nuclear medicine technology*, vol. 29, pp. 4-11, 2001.
- [10] P. Lecoq, "Pushing the Limits in Time-of-Flight PET Imaging," *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, vol. 1, pp. 473-485, 2017.

- [11] S. R. Cherry, J. A. Sorenson, and M. E. Phelps, "Tomographic reconstruction in nuclear medicine," *Cherry S, Sorenson JA, Phelps ME. Physics in Nuclear Medicine. 3rd ed. Philadelphia, PA: WB Saunders*, pp. 273-298, 2003.
- [12] M. N. Ullah, E. Pratiwi, J. Cheon, H. Choi, and J. Y. Yeom, "Instrumentation for Time-of-Flight Positron Emission Tomography," *Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, vol. 50, pp. 112-122, 02/22 2016.
- [13] A. Samson, C. Thibaudeau, J. Bouchard, É. Gaudin, C. Paulin, R. Lecomte, *et al.*, "A fully automated and scalable timing probe-based method for time alignment of the LabPET II scanners," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 889, pp. 1-6, 2018/05/01/ 2018.
- [14] H. Li, C. Wang, S. An, X. Lu, Y. Dong, S. Liu, *et al.*, "An Accurate Timing Alignment Method with Time-to-Digital Converter Linearity Calibration for High-Resolution TOF PET," *IEEE transactions on nuclear science*, vol. 62, pp. 799-804, 06/03 2015.
- [15] I. Verel, G. W. Visser, and G. A. van Dongen, "The promise of immuno-PET in radioimmunotherapy," *Journal of Nuclear Medicine*, vol. 46, pp. 164S-171S, 2005.
- [16] L. Njejimana, M. A. Tetrault, L. Arpin, A. Burghgraeve, P. Maille, J. C. Lavoie, *et al.*, "Design of a Real-Time FPGA-Based Data Acquisition Architecture for the LabPET II: An APD-Based Scanner Dedicated to Small Animal PET Imaging," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 3633-3638, 2013.
- [17] V. Keereman, R. Van Holen, S. Vandenberghe, and C. Vanhove, "Temperature dependence of APD-based PET scanners," *Medical Physics*, vol. 40, p. 092506, 2013.
- [18] A. Boudkhil and B. Soudini, "Analysis of fundamental photodetection noises and evaluation of pin and apd photodiodes performances using an optical high debit transmission chain simulated by optisystem," *International Journal of Computer Applications*, vol. 115, 2015.
- [19] M. Bergeron, C. Thibaudeau, J. Cadorette, M. Tétrault, C. M. Pepin, J. Clerk-Lamallice, *et al.*, "LabPET II, an APD-based Detector Module with PET and Counting CT Imaging Capabilities," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 62, pp. 756-765, 2015.

- [20] A. O. Boudkhil, Asmaâ; Soudini, Belabbes, "Analysis of Fundamental Photodetection Noises and Evaluation of PIN and APD Photodiodes Performances using an Optical High Debit Transmission Chain Simulated by Optisystem," *International Journal of Computer Applications*, vol. 115, pp. 21-29, 04 2015.
- [21] P. Verma and R. A. Mishra, "Temperature Dependence of Propagation Delay Characteristic in LECTOR based CMOS Circuit," 2012.
- [22] R. Kumar and V. Kursun, "Impact of temperature fluctuations on circuit characteristics in 180nm and 65nm CMOS technologies," in *2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2006, p. 4 pp.
- [23] Q. Li, J. He, W. Hu, L. Chen, X. Chen, and W. Lu, "Influencing Sources for Dark Current Transport and Avalanche Mechanisms in Planar and Mesa HgCdTe pin Electron-Avalanche Photodiodes," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 65, pp. 572-576, 2018.
- [24] P. Dokhale, J. Schmall, C. Stapels, J. Christian, S. R. Cherry, M. R. Squillante, *et al.*, "Imaging and timing performance of 1 cm x 1 cm position-sensitive solid-state photomultiplier," *Journal of Instrumentation*, vol. 8, p. C02033, 2013.
- [25] B. J. Lee, C.-M. Chang, and C. S. Levin, "PET System Technology Designs for Achieving Simultaneous PET/MRI," in *PET/MRI in Oncology*, ed: Springer, 2018, pp. 1-26.
- [26] electronics-cooling. (2018, 15-10). *how my electronics should be oriented a thermal point of view study to understand the impact of orientation on internal air temperature*. Available: <https://www.electronics-cooling.com/2018/09/how-my-electronics-should-be-oriented-a-thermal-point-of-view-study-to-understand-the-impact-of-orientation-on-internal-air-temperature/#>
- [27] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, and F. G. Bulnes, "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing," *Sensors*, vol. 14, pp. 12305-12348, 2014.
- [28] S. Addepalli, Y. Zhao, R. Roy, W. Galhenegge, M. Colle, J. Yu, *et al.*, "Non-destructive evaluation of localised heat damage occurring in carbon composites using thermography and thermal diffusivity measurement," *Measurement*, vol. 131, pp. 706-713, 2019.

- [29] JEDEC. (2020, 23-2). *Global Standards for the Microelectronics Industry*. Available: <https://www.jedec.org/>
- [30] UQO. (2019, 05-20). *Recherche de bases de données*. Available: http://decouverte.quebec.ca:1701/primo_library/libweb/action/dlSearch.do?ab=default_tab&institution=UQO&onCampus=false&indx=1&dum=true&vid=UQO&group=GUEST&search_scope=UQOPLUS&query=any%2Ccontains%2Ca&prefLang=fr_FR
- [31] UOttawa. (2019, 05-20). *Databases A-Z*. Available: <https://biblio.uottawa.ca/en/databases>
- [32] E. Britannica. (2018, 28-10). *Joule's law*. Available: <https://www.britannica.com/science/Joules-law>
- [33] J. P. Uyemura, "Electrical characteristics of MOSFETs," in *Introduction to VLSI Circuits and Systems*, ed USA: John Wiley & Sons, INC, 2002.
- [34] M. Andresen, K. Ma, G. Buticchi, J. Falck, F. Blaabjerg, and M. Liserre, "Junction temperature control for more reliable power electronics," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, pp. 765-776, 2018.
- [35] S. ZENGİN and M. BOZTEPE, "Lifetime Estimation of DCM Flyback Micro-inverter," 2014.
- [36] C. Liu, *Foundations of MEMS*: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [37] J. Lienhard IV and J. Lienhard, "DOE fundamentals handbook: thermodynamics, heat transfer, and fluid flow," *Washington, DC: US Department of Energy*, 2008.
- [38] IDT, "AN-842, Thermal Considerations in Package Design and Selection, Integrated Device Technology," ed: Inc, 2014.
- [39] JEDEC. (2018, 21-10). *JEDEC Solid State Technology Association*. Available: <https://www.jedec.org/>
- [40] MAXIM-INTEGRATED, "Thermal Considerations of QFN and Other Exposed-Paddle Packages," MAXIM 11/202001.
- [41] N. Seshasayee (TI), "Understanding thermal dissipation and design of a heatsink," *Texas Instruments, Dallas*, 2011.

- [42] C. University. (2018). *Heat Transfer Principles in Electronics Cooling*. Available: <http://www.pathways.cu.edu.eg/ec/Text-PDF/Part%20B-4.pdf>
- [43] datasheetcatalog. (2018, 03-11). *Derating factor*. Available: <http://www.datasheetcatalog.com/>
- [44] T. Instruments, "CMOS power consumption and cpd calculation," *SCAA035B June*, 1997.
- [45] nuclear-power. (2018, 06-11). *Convection – Convective Heat Transfer*. Available: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/convection-convective-heat-transfer/>
- [46] H. Brouwers, "Stagnant film model for effect of diffusional layer thickness on heat transfer and exerted friction," *AIChE journal*, vol. 41, pp. 1821-1825, 1995.
- [47] N. Chougule, G. Parishwad, P. Gore, S. Pagnis, and S. Sapali, "CFD analysis of Multi-jet air Impingement on flat plate," in *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2011, pp. 2078-0958.
- [48] N. power. (2018, 11-10). *Hydraulic Diameter*. Available: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/internal-flow/hydraulic-diameter-2/>
- [49] F. M. White, *Fluid Mechanics*, Seventh ed.: McGraw-Hill, 2011.
- [50] F. P. INCROPERA, D. P. DEWITT, T. L. BERGMAN, and A. S. LAVINE, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. United States of America: Daniel Sayre, 2007.
- [51] J. N. Livingood and P. Hrycak, "Impingement heat transfer from turbulent air jets to flat plates: a literature survey," 1973.
- [52] X. C. Tong, "Liquid Cooling Devices and Their Materials Selection," in *Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging*, ed New York, NY: Springer New York, 2011, pp. 421-475.
- [53] X. Liu, J. Lienhard, and J. Lombara, "Convective heat transfer by impingement of circular liquid jets," *Journal of heat transfer*, vol. 113, pp. 571-582, 1991.
- [54] S. Ashforth-Frost and K. Jambunathan, "Effect of nozzle geometry and semi-confinement on the potential core of a turbulent axisymmetric free jet,"

- International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 23, pp. 155-162, 1996.
- [55] J. Foss and S. Kleis, "Mean Flow Characteristics for the Oblique Impingement of an Axisymmetric Jet," *AIAA journal*, vol. 14, pp. 705-706, 1976.
- [56] S. V. Garimella and B. Nenaydykh, "Nozzle-geometry effects in liquid jet impingement heat transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 2915-2923, 1996.
- [57] C. Ma, Q. Zheng, H. Sun, K. Wu, and K. Horii, "Local convective heat transfer from a vertical flat surface to oblique submerged impinging jets of large Prandtl number liquid," *Experimental thermal and fluid science*, vol. 17, pp. 238-247, 1998.
- [58] L. Gabour and J. Lienhard, "Wall roughness effects on stagnation-point heat transfer beneath an impinging liquid jet," *Journal of heat transfer*, vol. 116, pp. 81-87, 1994.
- [59] D. Lytle and B. Webb, "Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1687-1697, 1994.
- [60] R. Goldstein and J. Timmers, "Visualization of heat transfer from arrays of impinging jets," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 25, pp. 1857-1868, 1982.
- [61] I. Clitan, D. Moga, V. Muresan, N. Stroia, I.-V. Sita, C. Lungoci, *et al.*, "Digital Temperature Control for an Hyperthermic Intraperitoneal Chemotherapy Equipment," in *Control Systems and Computer Science (CSCS), 2015 20th International Conference on*, 2015, pp. 98-103.
- [62] A. A. Aguirre, L. D. Muñoz, C. A. Martín, M. J. Ramírez, and C. A. Salazar, "Design of Digital PID Controllers Relying on FPGA-based Techniques," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 936-941, 2018.
- [63] S. Lopez-Buedo, J. Garrido, and E. I. Boemo, "Dynamically inserting, operating, and eliminating thermal sensors of FPGA-based systems," *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 561-566, 2002.
- [64] M. Sayde, A. Lakhssassi, M. Bougataya, O. Terkawi, and Y. Blaquièrre, "SoC systems thermal monitoring using embedded sensor cells unit," in *Circuits*

- and Systems (MWSCAS), 2012 IEEE 55th International Midwest Symposium on*, 2012, pp. 1052-1055.
- [65] F. Haugen, "The Good Gain method for PI (D) controller tuning," *Tech Teach*, pp. 1-7, 2010.
- [66] F. Shinskey, "PID-deadtime control of distributed processes," *Control engineering practice*, vol. 9, pp. 1177-1183, 2001.
- [67] F. G. Shinskey, "Process control diagnostics," *TECHNICAL PAPERS-ISA*, vol. 423, pp. 67-78, 2002.
- [68] W. Liu and B. Yang, *Thermography techniques for integrated circuits and semiconductor devices* vol. 27, 2007.
- [69] M. H. A. So. (2018, 10-15). *Industrial applications of infrared thermography analysis*. Available: <https://www.slideshare.net/MohammedHamedAhmedSo/industrial-applications-of-infrared-thermography-analysis>
- [70] G. M. Carlomagno and G. Cardone, "Infrared thermography for convective heat transfer measurements," *Experiments in fluids*, vol. 49, pp. 1187-1218, 2010.
- [71] J. Yang, M. Behnia, and G. Morrison, "Infrared thermography for true temperature measurement of the main board in personal computer," *Journal of Thermal Science*, vol. 11, pp. 331-336, 2002.
- [72] Flir. (2018, 15-10). *Two Dimensional Spatial Emissivity Correction Technique* Available: http://flir.custhelp.com/ci/fattach/get/36887/0/filename/T560460_A-en-US+Technical+publication+54++Emissivity+map+correction.pdf
- [73] Y. Rotrou, "Thermographie courtes longueurs d'onde avec des caméras silicium: contribution à la modélisation radiométrique," Ecole nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, 2006.
- [74] Fluke. (2018, 15-10). *How emissivity affects thermal images*. Available: <https://www.fluke.com/en-ca/learn/best-practices/measurement-basics/thermography/how-emissivity-affects-thermal-images>
- [75] J. S. T. S. G. (Fluke). (2018, 28-10). *Correcting Measurements Through Infrared Windows*. Available: <http://thermal-imaging->

blog.com/index.php/2010/09/15/correcting-measurements-through-infrared-windows/#comments

- [76] X. C. Tong, *Advanced materials for thermal management of electronic packaging* vol. 30: Springer Science & Business Media, 2011.
- [77] A. p. Martijn Heck, Department of Engineering, Aarhus University, Denmark. (2018, 29-10). *Optical computers light up the horizon - Moore's Law is dead: long live the laser!* Available: <http://sciencenordic.com/optical-computers-light-horizon>
- [78] R. H. Dennard, J. Cai, and A. Kumar, "A perspective on today's scaling challenges and possible future directions," in *Handbook of Thin Film Deposition (Fourth Edition)*, ed: Elsevier, 2018, pp. 3-18.
- [79] C. Gartenberg. (2018, 01-10). *The world's smallest transistor is 1nm long, physics be damned.* Available: <https://www.theverge.com/circuitbreaker/2016/10/6/13187820/one-nanometer-transistor-berkeley-lab-moores-law>
- [80] N. Z. Haron and S. Hamdioui, "Why is CMOS scaling coming to an END?," in *Design and Test Workshop, 2008. IDT 2008. 3rd International*, 2008, pp. 98-103.
- [81] Quora. (2018, 1-11). *What do you think of the global foundries giving up on developing 7 nanometer technologies?* Available: <https://www.quora.com/What-do-you-think-of-the-global-foundries-giving-up-on-developing-7-nanometer-technologies>
- [82] T. C. museum. (2011, 1-2018). *Shrinking Process size Shrinking Foundry Selection.* Available: <http://www.cpushack.com/2011/02/01/shrinking-process-size-shrinking-foundry-selection/>
- [83] R. Hott, R. Kleiner, T. Wolf, and G. Zwicknagl, "Superconducting Materials—A Topical Overview," in *Frontiers in Superconducting Materials*, ed: Springer, 2005, pp. 1-69.
- [84] T. B. Rasmussen and C. Marcus, "Analyzing current-phase relation in Josephson junctions on superconductor-semiconductor heterostructures," 2018.
- [85] R. Lutchyn, E. Bakkers, L. Kouwenhoven, P. Krogstrup, C. Marcus, and Y. Oreg, "Majorana zero modes in superconductor–semiconductor heterostructures," *Nature Reviews Materials*, p. 1, 2018.

- [86] H. Zhang, O. Gül, S. Conesa-Boj, K. Zuo, V. Mourik, F. K. de Vries, *et al.*, "Ballistic Majorana nanowire devices," *arXiv preprint arXiv:1603.04069*, vol. 10, 2016.
- [87] H. S. Arora, J. Banker, Y. Choi, J. Kemmer, and S. Nadj-Perge, "Fabrication and characterization of van der Waals Josephson junctions," *Bulletin of the American Physical Society*, 2018.
- [88] M. W. de Moor, J. D. Bommer, D. Xu, G. W. Winkler, A. E. Antipov, A. Bargerbos, *et al.*, "Electric field tunable superconductor-semiconductor coupling in Majorana nanowires," *arXiv preprint arXiv:1806.00988*, 2018.
- [89] Wikipedia. (2018, 29-10). *List of superconductors*. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_superconductors
- [90] H. S. Lee, D. H. Luong, M. S. Kim, Y. Jin, H. Kim, S. Yun, *et al.*, "Reconfigurable exciton-plasmon interconversion for nanophotonic circuits," *Nature communications*, vol. 7, p. 13663, 2016.
- [91] V. Krishnamurthy, Y. Chen, and S.-T. Ho, "Photonic transistor design principles for switching gain ≥ 2 ," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, pp. 2086-2098, 2013.
- [92] M.-L. Ren, J. S. Berger, W. Liu, G. Liu, and R. Agarwal, "Strong modulation of second-harmonic generation with very large contrast in semiconducting CdS via high-field domain," *Nature communications*, vol. 9, p. 186, 2018.
- [93] A. Labs. (2018, 29-10). *SUPERNOVA LIGHT SUPPLIES*. Available: <https://ayarlabs.com/product/>
- [94] T. Instruments. (2018, 03-11). *Quad Flat No Lead (QFN)*. Available: <http://www.ti.com/packaging/docs/searchtipackages.tsp?packageName=QFN>
- [95] J. Jackson and A. O'Donnell, "MicroCSPTM Wafer Level Chip Scale Package," *Analog Devices AN-617 Application Note, Rev. B*, pp. 1-12.
- [96] MAXIM_INTEGRATED, "WAFER-LEVEL PACKAGING (WLP) AND ITS APPLICATIONS," *APPLICATION NOTE 1891*, p. 8, 2018.
- [97] NXP, "Wafer-level chip-scale package (fan-in WLP and fan-out WLP)," *Application note AN10439 Rev. 8*, p. 25, 2018.
- [98] W. L. C. S. Package, "Freescale Semiconductor Application Note, Aug. 2009, 16 pages," *AN3846, Rev*, vol. 2.

- [99] T. Zhou and A. Samoilov, "Thermal management for wafer level packaging (WLP)," in *2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2014, pp. 1679-1684.
- [100] D. Edwards and H. Nguyen, "Semiconductor and IC Package Thermal Metrics," *Application Report, Texas Instruments, Dallas, TX, Report No. SPRA953B*. <http://www.ti.com/lit/an/spra953c/spra953c.pdf>, 2012.
- [101] Integrated_Device_Technology, "Thermal Considerations in Package Design and Selection, Integrated Device Technology," ed: Application note AN842, 2014, p. 15.
- [102] N. Zaharia. (2018, 05-11). *Passive Cooling vs. Active Cooling – What's the Difference?* Available: <https://www.simscale.com/blog/2017/01/active-and-passive-cooling/>
- [103] N. Z. (simscale). (2018, 05-11). *Passive Cooling vs. Active Cooling – What's the Difference?* Available: <https://www.simscale.com/blog/2017/01/active-and-passive-cooling/>
- [104] B. Šavija, "Smart Crack Control in Concrete through Use of Phase Change Materials (PCMs): A Review," *Materials*, vol. 11, 2018.
- [105] Advnced_Cooling_Technologies. (2018, 07-11). *HEAT PIPE FUNDAMENTALS*. Available: <https://www.1-act.com/resources/heat-pipe-fundamentals/>
- [106] D. k. c. f. h. p. technology. (2010, 07-10). *The basics of Heat Pipe*. Available: <http://www.heatpipe.nl/index.php?page=heatpipe&lang=EN>
- [107] S. S. Hada and P. Jain, "Influence of Different Parameters on Heat Pipe Performance," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 5, pp. 93-98, 2015.
- [108] R. Kempers, A. Robinson, and A. Lyons, "Characterization of metal micro-textured thermal interface materials," in *Thermal Investigations of ICs and Systems, 2009. THERMINIC 2009. 15th International Workshop on*, 2009, pp. 210-215.
- [109] T. Ziitek. (2018, 11-11). *Thermal managment and interface materials*. Available: <http://www.thermalconductivematerials.com/>
- [110] B. Thermal. (2018, 16-11). *Cold Plate Cooling Chillers*. Available: <https://www.bvthermal.com/cold-plate-cooling-chillers/>

- [111] John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 4th ed. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2011.
- [112] Advanced_Cooling_Technologies. (2019, 25-4). *PUMPED TWO PHASE COOLING SOLUTIONS*. Available: https://www.1-act.com/products/pumped-two-phase-cooling-solutions/?utm_campaign=IP%20-%20P2P&utm_source=hs_email&utm_medium=email&utm_content=68961988&_hsenc=p2ANqtz-9LFU4Twy9PHb_UpJPxM-qdu-uTrVQNS1LzBwgoG26BMHMdK7ZRQc0TEj9MfjZz_D4FHozjvzXpe_FtkP5qu39rO8nDaQ&_hsmi=68961988
- [113] ANSYS. (2018, 08-10). *16.5.11 Turbulence Models*. Available: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node330.htm>
- [114] S. W. (engineering.com). (2016, 08-2018). *Choosing the Right Turbulence Model for Your CFD Simulation*. Available: <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>
- [115] T. Wei, H. Oprins, V. Cherman, J. Qian, I. D. wolf, E. Beyne, *et al.*, "High efficiency polymer based direct multi-jet impingement cooling solution for high power devices," *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1-1, 2018.
- [116] K. Agbim, D. Pahinkar, and S. Graham, "Integration of Jet Impingement Cooling with Direct Bonded Copper Substrates for Power Electronics Thermal Management," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, pp. 1-1, 2018.
- [117] J. Jörg, S. Taraborrelli, G. Sarriegui, R. W. De Doncker, R. Kneer, and W. Rohlf, "Direct single impinging jet cooling of a MOSFET power electronic module," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, pp. 4224-4237, 2018.
- [118] C. Zing and S. Mahjoob, "Numerical Investigation of Thermal Transport in Confined Single and Multiple Jet Impingements Through Porous Filled Non-Uniform Cross Section Channels," in *2018 17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 2018, pp. 455-464.
- [119] Versarien_Technologies. (2019, 29-04). *Low Profile Metallic Foam Heat Sinks*. Available: <https://www.mouser.ca/datasheet/2/733/VTL-LowProfileHeatsink-DATASHEET-MARCH2015fv-552995.pdf>

- [120] D. F. Hsu, D. L. Freese, P. D. Reynolds, D. R. Innes, and C. S. Levin, "Design and performance of a 1 mm 3 resolution clinical PET system comprising 3-D position sensitive scintillation detectors," *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 37, pp. 1058-1066, 2018.
- [121] D. Freese, A. Vandenbroucke, D. Innes, F. Lau, D. Hsu, P. Reynolds, *et al.*, "Thermal regulation of tightly packed solid - state photodetectors in a 1 mm³ resolution clinical PET system," *Medical physics*, vol. 42, pp. 305-313, 2015.
- [122] A. Vandenbroucke, T. McLaughlin, and C. Levin, "Influence of temperature and bias voltage on the performance of a high resolution PET detector built with position sensitive avalanche photodiodes," *Journal of Instrumentation*, vol. 7, p. P08001, 2012.
- [123] D. Schweitzer, F. Ender, G. Hantos, and P. G. Szabó, "Thermal transient characterization of semiconductor devices with multiple heat sources—Fundamentals for a new thermal standard," *Microelectronics Journal*, vol. 46, pp. 174-182, 2015.
- [124] K. Yazawa, D. Kendig, D. Hernandez, K. Maze, and A. Shakouri, "Challenges and opportunities for transient thermal imaging of microelectronic devices," in *18th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems*, 2012, pp. 1-4.
- [125] W.-H. Chen, H.-C. Cheng, and H.-A. Shen, "An effective methodology for thermal characterization of electronic packaging," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 26, pp. 222-232, 2003.
- [126] J. S. S. T. Association, "DELPHI COMPACT THERMAL MODEL GUIDELINE," *JEDEC Board Ballot JC-15-04-288A, formulated under the cognizance of the JC-15.1 Committee on Thermal Characterization. (JESD15-4)*, p. 20, 1997.
- [127] Varicam. (2015, 28-10). *VarioCAM high resolution User Manual*. Available: <https://de.infratec.eu/downloads/en/thermography/manuals/infratec-manual-variocam-hr.pdf>
- [128] Grayess. (2018, 28-10). *IRT Analyzer 6.0 - Professional thermographic analysis and reporting tool for reasearchers*. Available: <http://www.grayess.com/software/irt-analyzer/>
- [129] TI. (2018, 15-10). *The proper way to IC package thermal Metrics* Available: <http://www.ti.com/lit/an/spra953c/spra953c.pdf>

- [130] T. microsystems. (2018, 10-11). *Thermoelectric Coolers FAQ*. Available: https://www.tec-microsystems.com/Download/Docs/TEC_FAQ_TCM.pdf
- [131] SANYO_DENKI. (2019, 15-05). *San Ace COOLING FAN Data Sheet*. Available: https://www.sanyodenki.com/archive/document/product/cooling/catalog_E_pdf/San_Ace_E.pdf
- [132] NOREN. (2019, 15-05). *CC3065PHL-TYPE, COMPACT CABINET COOLER (COPPER CORE) AIR-TO-WATER FLUSH-MOUNT MODEL*. Available: <https://norenthermal.com/wp-content/uploads/2017/05/Noren-CC3065PHL.pdf>
- [133] ThermoFisher_Scientific. (2019, 20-05). *ThermoFlex 1400 Recirculating Chiller*. Available: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/TF900>