

Titre: Méthodes de conception et de partitionnement logiciel pour des architectures parallèles SIMD linéaires
Title: architectures parallèles SIMD linéaires

Auteur: Nicolas Contandriopoulos
Author:

Date: 1998

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Contandriopoulos, N. (1998). Méthodes de conception et de partitionnement logiciel pour des architectures parallèles SIMD linéaires [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/8620/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8620/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Yvon Savaria
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

NOTE TO USERS

**Page(s) not included in the original manuscript
are unavailable from the author or university. The
manuscript was microfilmed as received.**

107 - 108

This reproduction is the best copy available.

UMI

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE
L'IMAGERIE THERMIQUE PAR FLUORESCENCE
POUR L'ANALYSE DE DÉFAILLANCE DES FLIP CHIPS

NICOLAS BOYER
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE ET
DE GÉNIE DES MATÉRIAUX
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX)
AVRIL 1999



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

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

0-612-42899-0

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉVALUATION DES PERFORMANCES DE
L'IMAGERIE THERMIQUE PAR FLUORESCENCE
POUR L'ANALYSE DE DÉFAILLANCE DES FLIP CHIPS

Présenté par: BOYER Nicolas

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. MASUT Remo, Ph.D., président

Mme. SIMARD-NORMANDIN Martine, Ph.D., membre et directrice de recherche

M. MEUNIER Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. MARTINU Ludvick, Ph.D., membre

Remerciements

La réalisation de ce projet a été rendue possible grâce à la collaboration de l'École Polytechnique et de plusieurs membres de différents départements chez *Nortel Networks*.

Je tiens d'abord à remercier mes directeurs, le D^r Martine Simard-Normandin et le professeur Michel Meunier pour leur disponibilité et leur support professionnel tout au long de ce cycle. Ils ont contribué grandement à me faire découvrir et apprécier les milieux scientifiques et de la haute technologie.

Je remercie le professeur Remo Masut d'avoir accepté de présider le jury d'examen de même que le professeur Ludvick Martinu pour sa participation au jury.

Un merci tout spécial va au D^r Denis Masson qui a guidé mes recherches et m'a prodigué plusieurs conseils précieux. Ses amitiés furent aussi des plus appréciées.

Je me dois de souligner l'accueil et le support technique de tous mes collègues au *Centre for Microanalysis* chez *Nortel Networks*. Je remercie en particulier Robin Collins pour les dépositions de tungstène qu'il a effectuées à l'aide du FIB.

Du groupe *GaAs IC Development* de *Nortel Networks*, je remercie particulièrement Brian Oliver pour ses entretiens utiles et pour les dispositifs BJT qu'il m'a procurés.

D'autre part, je remercie Elizabeth Tencer, Bill Davies, Paul Too et John Hammer du groupe *Advanced Package Technology* qui ont accepté de mettre sous boîtier les structures-test requises pour mes analyses.

Merci à mes parents qui, même à distance, furent d'un soutien moral encore irréprochable. Merci à mes amis, à Ottawa ou à Montréal, avec qui j'ai pu partager les hauts et les bas du quotidien.

Finalement, je reconnais le soutien financier du Centre for Microanalysis de *Nortel Networks* de même que la contribution du Groupe de Recherche en Physique et Technologie des Couches Minces de l'École Polytechnique.

RÉSUMÉ

L'objectif principal de cet ouvrage est d'évaluer la possibilité d'utiliser l'imagerie thermique par fluorescence (FTI) pour l'analyse de défaillance des dispositifs flip chips. Les moyens permettant d'optimiser la sensibilité de la technique et la possibilité d'utiliser FTI pour effectuer des mesures absolues de température ont aussi été étudiés.

L'imagerie thermique par fluorescence se base sur la dépendance en température d'un composé fluorescent, l'europium thenoyl trifluoroacetonate (EuTTA). Ce composé, mélangé à du polymethylmethacrylate (PMMA) dans une solution de chlorobenzène, est déposé à la surface des dispositifs. Le chlorobenzène s'évapore pour laisser un film solide en surface. L'intensité de la fluorescence émise par ce film exposé à une excitation ultraviolette permet de déterminer la température. La déposition de films d'EuTTA/PMMA d'épaisseur de 1 μm permet d'obtenir les meilleures conditions expérimentales. On s'assure ainsi que l'intensité de la fluorescence est suffisante pour toute la durée d'une expérience et on évite la formation d'artefacts spatiaux importants dus au blanchiment tout en limitant la perte de résolution spatiale engendrée par la diffusion thermique.

L'optimisation du temps d'exposition et le recours à l'expansion de dynamique permettent d'optimiser la sensibilité de la technique. D'autre part, en moyennant plusieurs ratios d'images "chaudes" sur "froides", on est en mesure d'augmenter le rapport signal/bruit.

Une méthode de calibration permettant de mesurer des températures absolues, jusqu'à un maximum de 60°C, est présentée. Les mesures de température

effectuées sur des transistors bipolaires de $2 \times 2 \mu\text{m}$ sont en accord avec les résultats obtenus par une technique employant des cristaux liquides. L'incertitude sur les mesures croît avec la température. Elle est de l'ordre de $\pm 2,3^\circ\text{C}$ à 52°C .

Une structure-test a été élaborée afin d'établir la résolution spatiale de l'imagerie thermique par fluorescence appliquée aux flip chips. Dans ce cas, l'analyse se fait à partir de l'endos du dispositif et non directement du côté de la circuiterie. Trois conclusions principales peuvent être tirées de cette étude.

- i) La résolution spatiale diminue avec l'épaisseur de la puce puisqu'elle est réduite par la diffusion thermique. La largeur à mi-hauteur des profils de température étudiés décroît linéairement avec la décroissance de l'épaisseur de la puce. Ces résultats sont en accord avec un modèle théorique.
- ii) Lorsque la puce est polie à une épaisseur d'environ $5 \mu\text{m}$, il est possible de localiser le centre des distributions de température avec une précision de l'ordre de $\pm 2 \mu\text{m}$. En analyse de défaillance, on serait donc en mesure de localiser un point chaud avec une précision du même ordre.
- iii) Pour une puce de $5 \mu\text{m}$ d'épaisseur, les lignes résistives étudiées sont discernables lorsqu'elles sont séparées d'au moins $40 \mu\text{m}$. Deux points chauds (sites de défaillance) séparés par une distance inférieure à $40 \mu\text{m}$ ne peuvent donc pas être distingués et vont apparaître comme un seul point chaud.

Notons finalement que les profils de température obtenus pour une puce de $5 \mu\text{m}$ d'épaisseur révèlent aussi l'effet dissipatif des billes de soudure.

Abstract

The main purpose of this work is to evaluate the usefulness of fluorescent microthermal imaging (FMI) in failure analysis of flip chip packages. The tools allowing the optimization of the technique are investigated as well as the possibility to make absolute temperature measurements using FMI.

The fluorescent microthermal imaging technique relies on the temperature dependence of a europium compound: europium thenoyl trifluoroacetonate (EuTTA). This compound is mixed with polymethylmethacrylate (PMMA) in a chlorobenzene solution. The mixture is then deposited on a device surface and allowed to cure in order to form a solid thin film. The deposition of a 1 μm thick film provides the best experimental conditions. This condition ensures that the film is thick enough to provide sufficient fluorescence intensity for the entire imaging period. The 1 μm thick film also restricts the formation of important spatial artefacts resulting from film bleaching while limiting the spatial resolution lost due to thermal diffusion.

By varying the exposure time and using a dynamic expansion technique, the sensitivity of FMI can be optimized. Moreover, the signal to noise ratio is improved by the averaging of several cold/hot images ratios.

A calibration method allowing absolute temperature measurements from room temperature up to 60°C is proposed. The results of the temperature measurements obtained by FMI on 2 x 2 μm bipolar transistors agree with those obtained using the liquid crystal technique. The uncertainty on the measurements done by FMI increases with temperature. It is $\pm 2,3^\circ\text{C}$ at 52°C.

A test structure was build in order to establish the spatial resolution of FMI applied to flip chip structures. In this case, the thermal analyses are performed from the backside of devices and not directly at the circuitry level. Three conclusions emerge from this study.

- i) The spatial resolution depends on the die thickness since it is reduced by thermal diffusion. The FWHM of the thermal distributions increases linearly with the substrate (Si die) thickness. These results agree with theoretical predictions.
- ii) The centroid of thermal distributions can be found within $\pm 2 \mu\text{m}$ for 5 μm thick dice. Thus, a hot spot could be localized to such a precision in a failure analysis experiment.
- iii) The resistive lines on our test structure can be resolved if they are at least 40 μm apart. Two hot spots localized within that distance could not be resolved and would appear as a single spot in a failure analysis.

Finally, the temperature mappings obtained for a 5 μm thick film reveal the heat sinking effect of the flip chip solder bumps.

Table des matières

Remerciements.....	iv
Résumé	vi
Abstract.....	viii
Table des matières	x
Liste des figures.....	xiv
Liste des tableaux.....	xvii
Liste des abréviations	xviii
Introduction	1
Chapitre 1 Imagerie thermique par fluorescence	6
1.1 Techniques de mesure de température utilisées en microélectronique	7
1.2 Choix de la technique de FMI pour l'analyse des flip chips	12
1.3 Imagerie thermique par fluorescence	14
1.3.1 Historique	14
1.3.2 Bases de la technique	15
1.3.3 Structures et propriétés de l'EuTTA	17

1.3.4 Déposition du film d'EuTTA	19
1.3.5 Blanchiment des films.....	20
Chapitre 2 Optimisation de la technique	23
2.1 Montage expérimental	23
2.1.1 Stabilité du montage	25
2.1.2 Uniformité de l'éclairement UV	25
2.1.3 Système de la caméra CCD	26
2.2 Mesures des caractéristiques du film	29
2.2.1 Mesures de profilométrie et de transmission	30
2.2.2 Mesures d'ellipsométrie.....	33
2.2.3 Discussion des mesures des caractéristiques du film.....	35
2.3 Optimisation de l'épaisseur des films	36
2.3.1 Dépendance du blanchiment sur l'épaisseur....	37
2.3.2 Variation de l'absorption en fonction du temps d'exposition aux UV	40
2.3.3 Conclusion.....	44
2.4 Optimisation de la sensibilité de la technique.....	45
2.4.1 Déposition d'un film épais et uniforme.....	45
2.4.2 Optimisation du temps d'acquisition et expansion de dynamique	45
2.4.3 Moyennage.....	48
2.5 Conclusions sur l'optimisation de la technique	54
Chapitre 3 Mesures absolues de température	55
3.1 Calibration de la technique de FMI.....	56
3.1.1 Méthodologie	56

3.1.2 Résultats de la calibration et discussion des résultats.....	59
3.2 Incertitude sur la mesure de température absolue	60
3.2.1 Incertitude sur $\delta\Delta T$	60
3.2.2 Détermination de T_f et δT_f ,.....	65
3.2.3 Variabilité des paramètres de calibration	67
3.3 Mesures absolues de température sur des transistors bipolaires utilisant FMI.	68
3.3.1 Description des dispositifs étudiés	68
3.3.2 Artefacts spatiaux.....	71
3.3.3 Résultat des mesures de température en fonction de la puissance dissipée	73
3.4 Comparaison de la technique des cristaux liquides avec FMI	74
3.5 Conclusion sur la validité des résultats de mesures absolues de température par FMI	76
 CHAPITRE 4 Mesures de température sur les flip chips	80
4.1 Polissage des échantillons	81
4.1.1 Équipement utilisé pour le polissage	81
4.1.2 Contrôle de l'épaisseur et du parallélisme.....	83
4.2 Préparation de la structure-test	85
4.2.1 Description du ZA19 et de la structure-test utilisée	85
4.2.2 Déposition de tungstène.....	88
4.2.3 Mise sous boîtier	90
4.3 Étude de la résolution spatiale des profils thermiques	91
4.4 Discussion des résultats.....	94

Conclusion	100
Références	103
Annexe 1 Calcul théorique de la diffusion de chaleur dans une couche mince	109

Liste des figures

Figure 1	Vue en coupe d'un boîtier traditionnel	1
Figure 2	Vue en coupe d'un flip chip	2
Figure 1.1	Montage utilisé pour la détection de points chauds par la technique des cristaux liquides.....	10
Figure 1.2	Structure moléculaire de l'EuTTA.....	18
Figure 1.3	Processus énergétiques au sein de la molécule d'EuTTA	19
Figure 2.1	Montage expérimental.....	24
Figure 2.2	Système de la caméra.....	26
Figure 2.3	Spectre du coefficient d'absorption pour chacun des quatre échantillons sur quartz	33
Figure 2.4	Spectre de l'indice de réfraction d'un film PMMA:EuTTA.....	34
Figure 2.5	Superposition des spectres d'absorption mesurés par ellipsométrie et par les mesures de transmission (pour l'échantillon #1)	35
Figure 2.6	Vue en coupe du film utilisé pour étudier la dépendance du blanchiment sur l'épaisseur du film	38
Figure 2.7	Effet de blanchiment observé en 6 régions du film correspondant à des épaisseurs différentes.....	39
Figure 2.8	Spectre d'absorption de 3 films exposés aux UV pendant 0 min., 30 min. et 60 min.	41
Figure 2.9	Distribution spatiale de l'intensité de la fluorescence en fonction du temps d'exposition aux UV	43

Figure 2.10 Optimisation du temps d'exposition et expansion de la dynamique pour des mesures qualitatives d'élévation de température	47
Figure 2.11 Optimisation du temps d'exposition et expansion de la dynamique pour des mesures quantitatives d'élévation de température	48
Figure 2.12 Structure résistive utilisée pour évaluer l'effet du Moyennage.....	52
Figure 3.1 Variations relatives de l'intensité de la fluorescence en fonction du temps d'exposition aux UV.	57
Figure 3.2 Montage utilisé pour la calibration	58
Figure 3.3 Variation du rapport de l'intensité des images de fluorescence en fonction de l'élévation de température	60
Figure 3.4 Détermination de l'incertitude sur ΔT	61
Figure 3.5 Distribution des intensités après division des images F/F_c	63
Figure 3.6 Erreur absolue sur la lecture de la variation de température....	65
Figure 3.7 Structure HBT étudiée.....	69
Figure 3.8 Vue en coupe du dispositif HBT étudié	70
Figure 3.9 Profil d'élévation de température à la surface d'un HBT	71
Figure 3.10 Effet optique responsable de l'artefact observé au niveau du montant sur les HBT.....	72
Figure 3.11 Température absolue à proximité du montant d'or en fonction de la puissance dissipée par le HBT.....	74
Figure 3.12 Comparaison des mesures absolues de température obtenues par FMI et par la technique des cristaux liquides	76
Figure 3.13 Gradient de température sur la connexion de l'émetteur tel que mesuré par FMI	77

Figure 4.1	Polisseur mécanique	82
Figure 4.2	Circuiterie du ZA19.....	86
Figure 4.3	Profil de température sur un dispositif ZA19	87
Figure 4.4	Circuit actif après la déposition du tungstène.....	89
Figure 4.5	Image SEM des courts-circuits A et B créés par la déposition de tungstène à l'aide du FIB	90
Figure 4.6	Profils de température obtenus de l'endos des flip chips pour des épaisseurs de la puce de 150 μm (a), 40 μm (b) et 5 μm (c).....	92
Figure 4.7	Profil de l'élévation de température selon la ligne OP représentée sur la figure 4.6c.....	93
Figure 4.8	Largeur à mi-hauteur des profils obtenus pour différentes épaisseurs et différentes dissipations de puissance	94
Figure 4.9	Schéma électrique du circuit test.....	97
Figure 4.10	Isothermes montrant l'effet dissipatif des billes de soudure	98
Figure A1	Géométrie et conditions frontières utilisées pour modéliser l'échange de chaleur dans les couches minces	109
Figure A2	Résultat de l'évaluation numérique de la distribution de température à la surface de films pour lesquels t=0, 1 et 5....	112
Figure A3	Largeur à mi-hauteur du profil de température calculée. en surface pour différentes épaisseurs t	113

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Principales techniques de thermométries utilisées en microélectronique	8
Tableau 2.1 Mesures d'épaisseur effectuées par profilométrie sur 5 échantillons	31
Tableau 2.2 Améliorations du rapport signal sur bruit obtenues par différentes opérations de moyennage et par filtrage.....	53
Tableau 3.1 Caractéristiques des distributions d'intensité obtenues pour le ratio F/F_c acquis à une température constante sous différentes conditions	64
Tableau 3.2 Chauffage induit par le rayonnement UV	66
Tableau 3.3 Puissance requise pour engendrer le changement de phase de différents cristaux liquides	75
Tableau 4.1 Papiers polisseurs à utiliser pour différentes épaisseurs du substrat	83

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

AFM	<i>Atomic Force Microscope</i>
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
CBE	<i>Chemical Beam Epitaxy</i>
CCD	<i>Charge-coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
EBIC	<i>Electron Beam Induced Current</i>
FCOB	<i>Flip Chip On Board</i>
FIB	<i>Focused Ion Beam</i>
FMI	<i>Fluorescent Microthermal Imaging</i>
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
MOCVD	<i>Metalorganic Chemical Vapor Deposition</i>
OBIC	<i>Optical Beam Induced Current</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>

INTRODUCTION

L'augmentation de la complexité des systèmes électroniques, la croissance du marché des appareils portatifs et le besoin de réduire leur coût de production ont amené le développement de la technologie des flip chips¹[1,2].

Dans les technologies traditionnelles de mise en boîtier, la puce est monté sur une plaquette de cuivre tel que montré sur la figure 1. Le tout est scellé dans un boîtier de plastique ou de céramique et les coussinets du circuit sont reliés aux pattes du boîtier par un microcâblage en or.

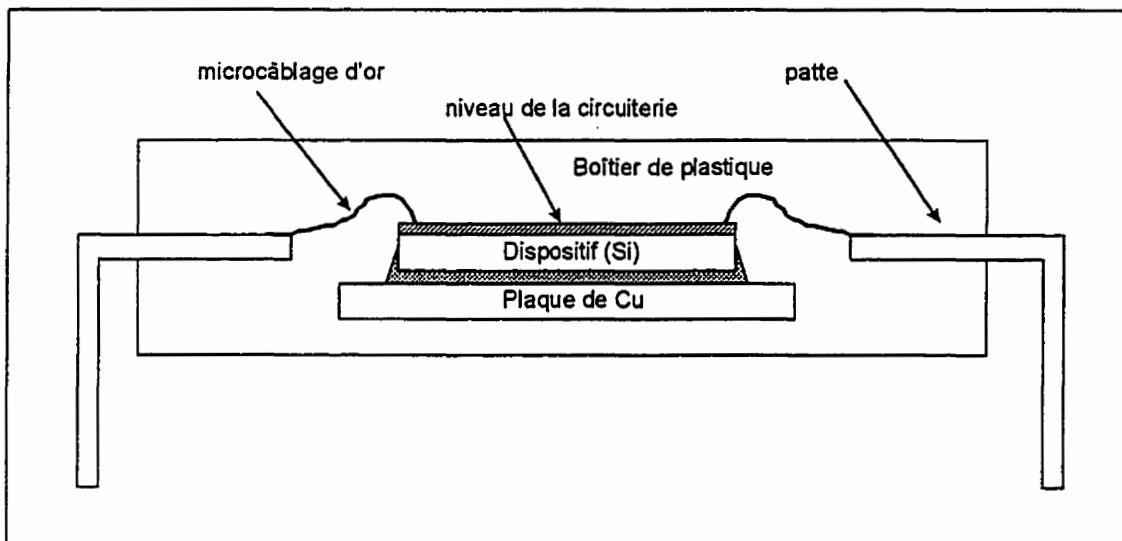


Figure 1. Vue en coupe d'un boîtier traditionnel.

Dans la technologie des flip chips, la puce est renversée et fixée directement à la plaquette du circuit imprimé (PCB) tel qu'ilustré à la figure 2. Des demi-

¹ La technologie des flip chips est aussi appelée *flip chip on board* (FCOB) ou *Controlled Collapsed Chip Connection* (C4).

sphères d'environ 100 µm de diamètre, d'un alliage de plomb et d'étain servent de soudure. Celles-ci maintiennent le dispositif en place tout en assurant les contacts électriques. Afin de minimiser les risques de rupture en cisaillement des dispositifs ainsi mis sous boîtier, une résine d'époxy est insérée entre la puce et la plaquette où elle se durcit pour former ce qu'on appelle l'encapsulant. Actuellement, Nortel ne fabrique que des flip chips à partir de substrats de silicium. Par sa simplicité, la technologie des flip chips permet de minimiser l'espace requis par chaque dispositif et donc de produire des PCB offrant une plus haute densité de dispositifs. Ces dispositifs sont plus légers et l'élimination du microcâblage dans le boîtier permet de réduire le bruit inductif à haute fréquence. La technologie des flip chips exige toutefois le développement de nouvelles techniques pour l'analyse de défaillance.

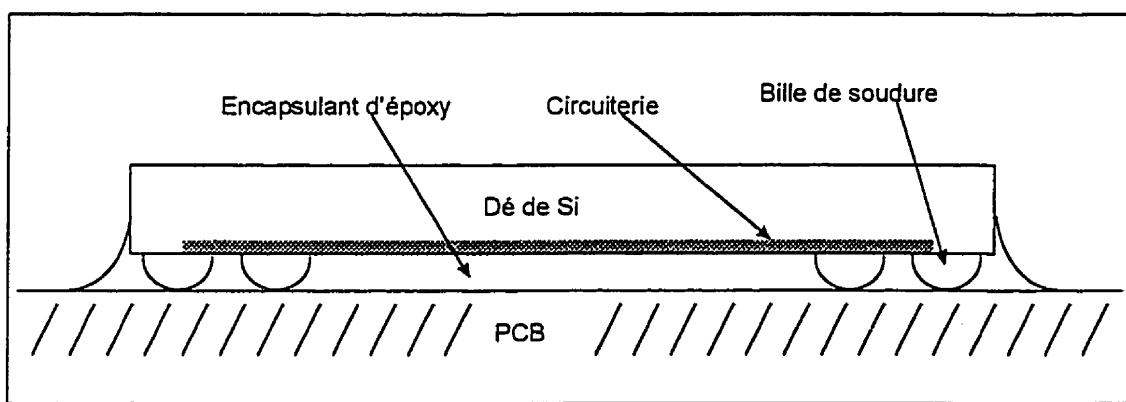


Figure 2. Vue en coupe d'un flip chip.

Généralement, en analyse de défaillance, la microscopie d'émission (i) et l'identification de "points" chauds (ii) permettent, sur un circuit actif, de localiser

la majorité des sites où des fuites de courant sont présentes². Ces derniers sont responsables de la majorité des défaillances rapportées [3].

- (i) La microscopie d'émission permet de localiser les sites où les recombinaisons électrons-trous sont importantes. La longueur d'onde de la lumière ainsi générée se situe généralement dans le visible (400-770 nm) ou le proche infrarouge (770-1500 nm). Cette technique permet d'identifier des diodes polarisées en direct ou en inverse, des transistors en saturation, des verrouillages ou des fuites aux grilles [4].
- (ii) Différentes techniques permettent de localiser les points chauds, à la surface des dispositifs, engendrés par des fuites ohmiques ou des courts-circuits. La technique utilisant les cristaux liquides (la plus populaire), la thermométrie par fluorescence, la thermométrie infrarouge ainsi que d'autres techniques moins répandues sont décrites au premier chapitre.

Pour les technologies traditionnelles de mise en boîtier, il est possible de dissoudre partiellement l'encapsulant de plastique dans l'acide nitrique afin de découvrir le circuit électronique [5]. Après la décapsulation, il est possible de mettre le dispositif sous tension, d'appliquer les signaux électriques nécessaires et d'utiliser la microscopie par émission ou une technique de mesure de température afin de localiser le ou les sites de défaillance à partir de la surface de la circuiterie qui est exposée.

Pour les flip chips, la circuiterie est couverte d'époxy et dissimulée entre le substrat de silicium et le PCB. En analyse de défaillance, il est alors difficile

² Parmi les techniques moins utilisées, on compte celles du courant induit par faisceau d'électrons (EBIC) et par faisceau optique (OBIC).

d'utiliser les techniques décrites plus haut puisqu'on ne peut examiner directement le niveau de la circuiterie. On ne peut pas ôter le PCB et l'encapsulant sans endommager la circuiterie. Il est donc important de développer de nouveaux outils et de nouvelles techniques pour les analyses de défaillance de ce type de boîtier qui se répand rapidement dans l'industrie.

L'objectif principal de ce mémoire est de démontrer qu'il est possible, à l'aide de l'imagerie thermique par fluorescence (FMI), d'effectuer des mesures de température sur des dispositifs flip chips à partir de l'endos de la puce. Le plus important sera de déterminer l'effet de la dissipation de la chaleur dans le substrat (la puce de silicium) sur la résolution spatiale. En effet, un point chaud, localisé au niveau de la circuiterie, générera une distribution de température plus ou moins étendue (et uniforme) à l'endos de la puce, là où la mesure de T^0 est effectuée. On doit vérifier qu'il est possible de localiser la source de chaleur (située près de l'interface encapsulant-puce) à partir d'une distribution de température plutôt diffuse observée à l'endos de la puce.

Bien qu'en principe l'imagerie thermique par fluorescence soit simple, la préparation des échantillons et l'acquisition des images exigent que plusieurs précautions soient prises afin d'obtenir des profils de température significatifs et d'une qualité optimale. Dans cet ouvrage on établit donc quelles sont les procédures et les outils permettant d'optimiser la technique de FMI.

Au chapitre 1, les différentes techniques de mesure de température utilisées dans l'industrie de la micro-électronique sont décrites et le choix de FMI comme technique d'analyse des flip chips est justifié. On y décrit ensuite la technique de FMI en détail.

Alors que la présentation de la technique au chapitre 1 se veut être principalement une revue de la littérature, le chapitre 2 présente les travaux que l'auteur a dû effectuer afin de mieux comprendre et de mieux maîtriser l'imagerie thermique par fluorescence. D'abord, le montage utilisé y est présenté en détail. Ensuite, les caractéristiques des films créés et les outils permettant d'optimiser la sensibilité de la technique y sont étudiés. Ces résultats couplés à une étude du phénomène de blanchiment permettent aussi de déterminer l'épaisseur optimale des films fluorescents à déposer.

La littérature mentionne la possibilité d'effectuer des mesures absolues de température par FMI [6]. Toutefois, aucun résultat ne vient vérifier cette affirmation. Le chapitre 3 présente les premiers résultats confirmant que la technique de FMI peut donner des lectures absolues de température. La technique des cristaux liquides est utilisée pour vérifier la validité des mesures de température obtenues par l'imagerie thermique par fluorescence sur des transistors bipolaires à hétérojonctions. Ces résultats seront utilisés afin d'évaluer les gradients de température observés sur les flip chips, en particulier au voisinage des billes de soudure. Ces résultats ouvrent aussi la porte à une multitude d'autres applications dans lesquelles des mesures de température absolues sont nécessaires et pour lesquelles FMI pourrait être la technique de choix.

Finalement, au chapitre 4, la technique de FMI est appliquée aux mesures de température sur les flip chips. La procédure de polissage, essentielle à l'obtention d'une résolution spatiale acceptable, est décrite. Une structure test a été élaborée et utilisée afin d'évaluer l'importance du polissage de la puce sur les mesures thermiques ainsi que de déterminer la limite de résolution spatiale de FMI à partir de l'endos des flip chips.

CHAPITRE 1 IMAGERIE THERMIQUE PAR FLUORESCENCE

En micro-électronique, les mesures de température à la surface des dispositifs sont d'un intérêt particulier en analyse de défaillance (i), dans les études de fiabilité (ii) et pour l'optimisation des performances des circuits ou d'autres dispositifs (iii).

- (i) En analyse de défaillance, les mesures de température se limitent le plus souvent à la localisation de points chauds engendrés par des fuites de courant.
- (ii) Les hausses de température locales importantes peuvent affecter la fiabilité des dispositifs. Par exemple, l'électromigration est un phénomène activé thermiquement qui peut réduire la durée de vie des dispositifs [7]. De plus, le chauffage local important d'un dispositif peut engendrer une fatigue thermique en certains points des boîtiers. Dans certains cas, des mesures de température sur des dispositifs permettent donc d'identifier la cause de la non-fiabilité ou du vieillissement prématué de ceux-ci.
- (iii) La technologie numérique CMOS (*Complementary Metal Oxyde Semiconductor*) est peu dépendante des variations de température. Toutefois, dans la technologie analogique, des variations locales de température peuvent affecter le comportement électronique des circuits. De façon plus marquée encore, les variations de température affectent les caractéristiques des dispositifs optoélectroniques. L'analyse de commutateurs thermiques optoélectroniques effectuée par FMI constitue un exemple où l'étude de la température est importante et permet d'optimiser les performances d'un circuit [8]. Dans ce cas, on doit s'assurer de l'uniformité de la température à la surface d'un modulateur Mach-Zehnder.

1.1 Techniques de mesure de température utilisées en micro-électronique

Le tableau 1.1 présente les principales techniques de thermométrie utilisées dans l'industrie de la micro-électronique. La résolution spatiale et la précision thermique des méthodes sont spécifiées. Dans la colonne de droite, les techniques desquelles on peut obtenir un profil de la température sur la surface entière d'un dispositif sont marquées d'un X.

La première méthode consiste à intégrer des dispositifs dans le circuit. La calibration de résistances [9] ou de diodes [10], la mesure du bruit thermique dans des résistances [11] ainsi que des mesures par thermocouple [7] permettent de déterminer la température en certains points d'un dispositif. La plupart des produits commerciaux n'ont pas de telles structures.

La spectroscopie Raman permet d'évaluer la température d'un point en mesurant le déplacement en fréquence d'une raie phononique importante ou en mesurant l'intensité relative des pics Stokes et anti-Stokes [12]. Cette technique est lente et ne fonctionne que pour des matériaux ayant un spectre Raman.

Tableau 1.1 Principales techniques de thermométrie utilisées en micro-électronique.

Technique	Résolution spatiale	Précision thermique	Caractéristiques principales	Profils
Dispositifs intégrés	< 1 µm (déterminé par la taille du dispositif)	± 2 °C	- Sonde fixe - On les trouve sur peu de dispositifs	
Spectroscopie Raman	< 1 µm	± 2-5 °C	- Utilisable que sur les matériaux ayant un spectre Raman. - Lent.	X
Cristaux liquides	> 1 µm	± 1 °C	- Lecture binaire - Simple et rapide	X
Thermographie infrarouge	5 - 10 µm	± 15-20 °C	- Mauvaise résolution spatiale - Instrumentation dispendieuse	X
Imagerie thermique par fluorescence	< 1 µm	± 2 °C	- Lecture indép. de la nature du matériau - Rapide - Bonne résolution spatiale	X
Variation de réflectance (avec laser)	< 1 µm	± 2-5 °C	Nécessite la connaissance de $n(T)$ en tout point	X
Microscope à force atomique (AFM)	< 0,5 µm	< ±0,1 °C	Surfaces étudiées de petites dimensions	

La technique des cristaux liquides est détaillée ici puisqu'elle est utilisée au chapitre 4 afin de vérifier certains résultats obtenus par FMI. La détection des points chauds à la surface de circuits micro-électronique par la technique des cristaux liquides date de la fin des années 70 [13,14,15]. Cette technique est encore la plus utilisée en analyse de défaillance pour la localisation des points chauds.

Les cristaux liquides sont des liquides dont les molécules montrent un certain alignement à longue portée. Toutefois, ceci n'est vrai que lorsque la température est inférieure à leur température de transition. Au-dessous de cette dernière, l'agitation thermique est suffisante pour détruire l'alignement des molécules. Les cristaux liquides se comportent alors comme des liquides normaux. Les cristaux liquides nématiques, qui sont biréfringents pour des températures inférieures à leur température de transition, sont utilisés pour la détection des points chauds à la surface des dispositifs.

Les cristaux liquides sont cancérigènes et bien qu'ils soient utilisés en infimes quantités, il convient d'éviter le contact direct avec la peau. Il est donc essentiel de suivre les règles de base de sécurité en laboratoire et de porter des gants et des lunettes de protection lors de leur manipulation.

Le cristal liquide est déposé à la surface de l'échantillon placé sous un microscope. Le montage est représenté à la figure 1.1. Un système constitué d'un analyseur et d'un polariseur dont les axes sont perpendiculaires permet de détecter le changement de phase du cristal liquide.

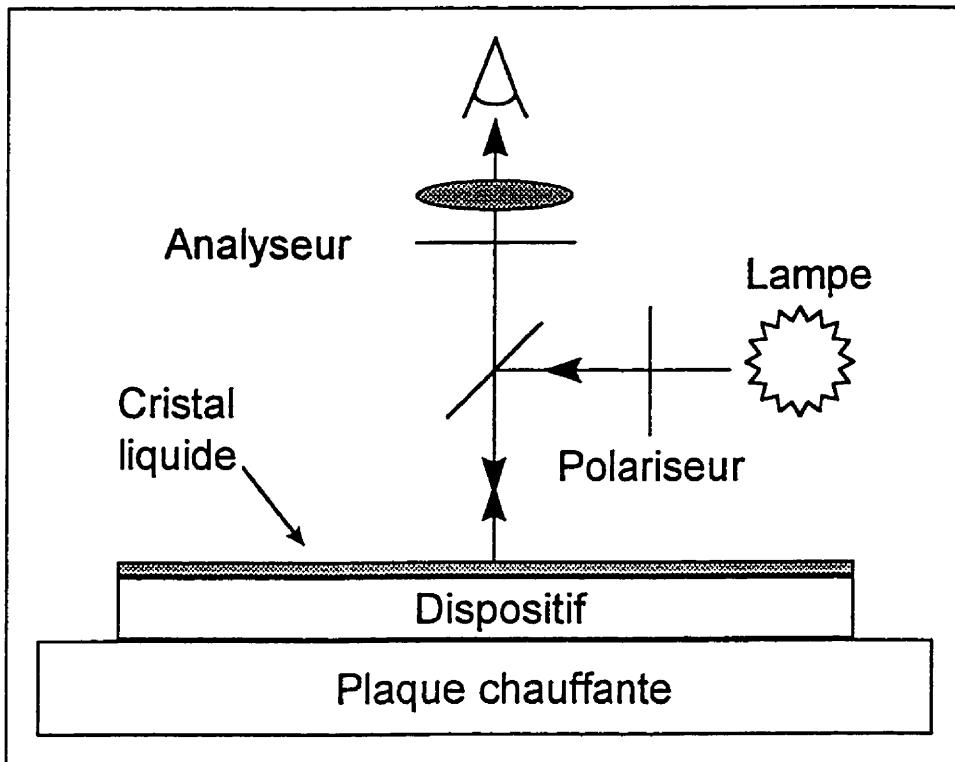


Figure 1.1. Montage utilisé pour la détection de points chauds par la technique des cristaux liquides.

La lumière polarisée linéairement et réfléchie des régions froides voit son axe de polarisation changée. Elle est donc observable à travers l'analyseur. Dans les régions où la température est supérieure à la température de transition, le phénomène de biréfringence disparaît; la polarisation de la lumière réfléchie est donc inchangée et ces régions apparaîtront très sombres lorsque vues au travers de l'analyseur. L'utilisation d'une plaque chauffante permet de maintenir le dispositif à une température juste au-dessous de la température de transition du cristal liquide. Ainsi, la moindre élévation de température à la surface du dispositif, engendrera le changement de phase du cristal liquide. Grâce à la plaque chauffante, on peut donc détecter des points chauds en appliquant de très faibles puissances.

La technique des cristaux liquides est peu dispendieuse et facile à utiliser. Toutefois, chaque cristal liquide ne donne qu'une mesure de température binaire. Il n'est possible de déterminer que si une région est au-dessus ou en-dessous de la température de transition du cristal liquide utilisé.

En thermographie infrarouge, l'intensité du rayonnement de corps noir d'un dispositif est mesurée afin de déterminer sa température [16,17]. Pour des températures de l'ordre de 300 à 400 K, les longueurs d'onde de radiance maximale, données par la loi de Wien, se situent entre 7 et 10 μm . Les systèmes commerciaux pouvant détecter les radiations dans cette gamme de longueur d'onde utilisent des détecteurs à l'antimoniure d'indium (InSb) ou au tellure de cadmium (CdTe). La résolution spatiale de cette technique est limitée par les longueurs d'ondes émises et elle est au mieux de 5 μm environ. La résolution thermique théorique est de l'ordre de 0,1 °C. Toutefois, un tel rendement est rarement atteint puisque cela requiert la connaissance exacte de l'émissivité en tout point de la surface analysée.

L'imagerie thermique par fluorescence (FTI) se base sur la dépendance en température d'un composé fluorescent, l'europium thenoyl trifluoroacetonate (EuTTA). La fluorescence à 612 nm de ce composé, déposé sur le dispositif, permet d'obtenir une résolution spatiale supérieure à 1 μm . Dans cet ouvrage, on démontre comment cette technique peut s'appliquer à l'analyse de défaillance des flip chips. FTI sera détaillée dans la section 1.3.

Deux techniques de mesure de température sont présentement au stade de développement. La première se base sur la variation de l'indice de réfraction des matériaux en fonction de la température. En utilisant un laser, il est

possible d'illuminer un point d'une surface et de mesurer les variations de l'indice de réfraction, et donc de déduire la température, en ce point. Afin d'obtenir le profil de température sur une surface, il faut donc connaître $n(T)$ en tout point. Ceci rend ardues les mesures de température sur des hétérostructures pour lesquelles $n(T)$ peut varier considérablement sur de très courtes distances [18]. La seconde technique, dont il existe plusieurs variantes, utilise le microscope à force atomique (AFM). Il est possible, d'utiliser un thermocouple à la pointe de l'AFM [19], de mesurer la variation de la résistance d'une pointe métallique [20] ou de mesurer la dilatation thermique de l'échantillon afin d'en déduire la température à la pointe de l'AFM [21]. La résolution spatiale de toutes ces variantes de la technique est très bonne. Toutefois, ces techniques sont encore au stade de développement et plusieurs problèmes restent irrésolus. Par exemple, la pointe de l'AFM draine la chaleur de la surface et perturbe les lectures de température. Finalement, notons que ces techniques ne permettent pas d'obtenir des profils de température sur de grandes surfaces.

1.2 Choix de la technique de FMI pour l'analyse des flip chips

En analyse de défaillance, le but premier est de localiser les points chauds afin d'identifier la ou les structures défectueuses. La technique de choix pour l'étude des flip chips devra donc permettre d'obtenir des profils de température de la surface entière des dispositifs dont la dimension typique est de quelques cm^2 . Les techniques répondant à ce critère sont marquées d'un X à la dernière colonne du tableau 1.1. Les techniques utilisant l'AFM sont rejetées puisqu'elles ne permettent pas de produire des profils de température sur des surfaces aussi grandes dans des temps raisonnables.

La technique des cristaux liquides, bien qu'elle soit simple et qu'elle permette de localiser des points chauds, ne procure qu'une information binaire. Elle ne permet donc pas d'étudier les gradients de température à la surface d'un dispositif. De plus, l'inhomogénéité de l'épaisseur du film de cristaux liquides déposé empêche, dans certains cas, de déterminer avec exactitude la position d'un point chaud.

De façon générale, tout microscope sur lequel est monté une caméra qui peut procurer des images numériques peut être utilisé pour FMI. Les systèmes les plus efficaces utilisent une caméra ayant une résolution de 16 bits/pixel relié directement à un ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition et de traitement d'images. Dans notre cas, l'imagerie thermique par fluorescence est effectuée sur un microscope Zeiss LSM (*Laser Scanning Microscope*). Les détails de ce système sont présentés au chapitre 2. Soulignons toutefois que ce microscope est équipé d'un laser HeNe opérant dans l'infrarouge à 1152 nm. Le silicium étant transparent à cette longueur d'onde, il est possible d'obtenir l'image de la circuiterie à partir de l'endos d'un flip chip. Sur ce système, on peut donc superposer l'image thermique, obtenue par FMI, à l'image du circuit obtenue dans le proche infrarouge afin d'identifier la structure défectueuse.

La thermographie dans l'infrarouge lointain (5 μm à 10 μm) permet aussi d'obtenir le profil de température à partir de l'endos d'un flip chip. Étant donné que le rayonnement infrarouge est très peu atténué dans la puce, cette technique peut potentiellement offrir une bonne résolution spatiale. Le rayonnement émanant directement du circuit (dissimulé entre l'encapsulant et la puce tel que montré à la figure 2), et passant au travers du substrat, est mesuré. Évidemment, les régions voisines de la source (incluant la circuiterie, l'encapsulant et le substrat de Si) sont chauffées et émettent aussi. Leur

rayonnement contribue à réduire considérablement la résolution thermique de la technique.

Les systèmes d'imagerie infrarouge et ceux de microscopie d'émission, tel le microscope Zeiss que nous avons utilisé, sont tous deux très dispendieux. Les systèmes d'imagerie dans l'infrarouge lointain sont utilisés spécifiquement pour effectuer des mesures thermiques. On ne les retrouve pas régulièrement dans les laboratoires d'analyse de défaillance. En revanche, les microscopes d'émission y sont plutôt répandus. L'importance de cet instrument pour la localisation des fuites de courant est mentionnée en introduction. L'implémentation de FMI sur un microscope à émission est relativement peu dispendieuse parce que les modifications à apporter au système standard sont mineures. On ne doit ajouter qu'une lampe UV et un filtre. À cause de ces considérations d'ordre pratique et économique, l'imagerie thermique par fluorescence est utilisée ici comme outil d'analyse de défaillance des flip chips.

1.3 Imagerie thermique par fluorescence (FMI)

1.3.1 Historique

Ce sont Tyson et Kolodner [22,23] qui, en 1982, furent les premiers à utiliser l'EuTTA afin de localiser des points chauds à la surface de circuits électroniques. La dépendance de la fluorescence de l'EuTTA sur la température était bien connue puisque dans les années soixante les chelates de terres rares avaient été étudiées afin de développer des lasers liquides [24]. Tyson et Kolodner ont développé la solution à base de PMMA et de chlorobenzène et le montage expérimental qu'ils ont utilisé était similaire à ceux que l'on utilise aujourd'hui.

En 1994, Barton présente un papier détaillant l'imagerie microthermique par fluorescence [6]. On y discute des mécanismes de fluorescence, de la dépendance de la fluorescence de l'EuTTA sur la température ainsi que de l'équipement pouvant être utilisé. Dans un second article publié en collaboration avec Tangyunyong [25], les problèmes liés au bruit quantique et au blanchiment des films sont soulevés et étudiés partiellement. Par la suite, plusieurs exemples d'application de la technique à l'analyse de défaillance ont été rapportés [26,27].

La littérature mentionne la possibilité d'utiliser l'imagerie microthermique par fluorescence pour effectuer des mesures absolues de température. Toutefois, aucun résultat de telles mesures ne sont présentés. Le blanchiment des films est le principal phénomène rendant difficiles les mesures absolues de température.

1.3.2 Bases de la technique

L'imagerie thermique par fluorescence consiste à déposer une couche mince contenant un chelate deuropium, leuropium thenoyl trifluoroacétonate (EuTTA), à la surface d'un dispositif. Ensuite, on mesure la variation de la fluorescence de ce film entre l'état où le dispositif est à froid et un état où il est sous tension. On peut alors obtenir le profil des variations de température à la surface d'un dispositif, ou pour être précis, à la surface du film d'EuTTA qui le recouvre.

L'imagerie microthermique par fluorescence repose sur la dépendance en température de la fluorescence de l'EuTTA. Lorsqu'excité par une source de

rayons ultraviolets, ce composé fluoresce. L'intensité de la fluorescence (F) dépend de plusieurs facteurs et peut être écrite sous la forme suivante:

$$F(x,y) = I(x,y) \cdot \eta(x,y) \cdot r(x,y) \cdot Q(T(x,y)) \quad (1.1)$$

où $I(x,y)$ représente l'intensité de l'excitation UV alors que η et r représentent le coefficient d'absorption et la réflectivité de l'échantillon respectivement. Q représente l'efficacité quantique du processus de fluorescence, c'est-à-dire, la fraction de l'énergie absorbée qui est réémise à 612 nm. A priori, seule l'efficacité quantique montre une dépendance sur la température. La dépendance en température des autres facteurs peut être négligée par rapport à $Q(T(x,y))$. La courbe du rendement quantique obtenue pour l'EuTTA dans une solution ether:isopentane:ethanol (5:5:2) [28] peut être représentée par une équation de la forme suivante [6]:

$$Q(T) = A - B \cdot e^{\gamma \cdot T} \quad (1.2)$$

où T est la température en degrés kelvin et A , B et γ des constantes positives dépendantes de la solution utilisée. La forme de cette équation illustre adéquatement les phénomènes en compétition discutés à la section 1.3.3.

Afin d'obtenir une image ne dépendant que de la température, on divise une image prise lorsque le dispositif est à froid (F_f) par une image prise lorsque le dispositif est sous tension (chaud) (F_c). On a donc:

$$F_D(x,y) = \frac{F_f(x,y)}{F_c(x,y)} = \frac{Q(T_f(x,y))}{Q(T_c(x,y))} \quad (1.3)$$

où $F_D(x,y)$ est l'image résultant de la division des images froide et chaude. Barton [6] démontre que sous 60 °C, l'élévation de température en un point est approximativement linéaire et décrite par la relation suivante:

$$\ln \frac{F_f(x,y)}{F_c(x,y)} = \ln \frac{Q(T_f(x,y))}{Q(T_c(x,y))} \approx a \cdot \Delta T(x,y) \quad (1.4)$$

ΔT représente la variation relative de température entre les états froids et chauds alors que a est la constante de proportionnalité qu'une calibration adéquate permet d'évaluer.

Pour des températures excédant 60 °C, un autre composé d'europium peut être utilisé: le perdeutéro-(tris-6,6,7,7,8,8,8-heptafluoro-2,2-dimethyl-3,5-octandionato) europium (dEuFOD). Ce composé a une structure et des propriétés d'absorption et d'émission similaires à celles de l'EuTTA. Il peut être utilisé pour des températures allant jusqu'à 200°C environ. L'EuTTA a une plus grande sensibilité thermique et la gamme des températures qu'il permet de mesurer est suffisante dans plusieurs applications d'analyse de défaillance. Le présent ouvrage détaille donc les caractéristiques de l'EuTTA plutôt que celles de l'EuFOD.

1.3.3 Structure et propriétés de l'EuTTA

Un chelate est un composé de coordination dans lequel un ion métallique est uni, par des liens covalents, à une molécule qu'on appelle le ligand. En général, le ligand entoure l'ion métallique central auquel il se lie par un ou plusieurs liens covalents [29]. Pour chaque lien, une paire d'électrons est fournie par un atome du ligand. Dans la plupart des cas, les atomes liants sont des éléments non-métalliques tels l'oxygène, l'azote ou le chlore. L'EuTTA est un chelate pour lequel l'ion métallique est remplacé par un ion d'europium qui se lie à trois atomes d'oxygène du ligand. La structure atomique de l'EuTTA est schématisée à la figure 1.2.

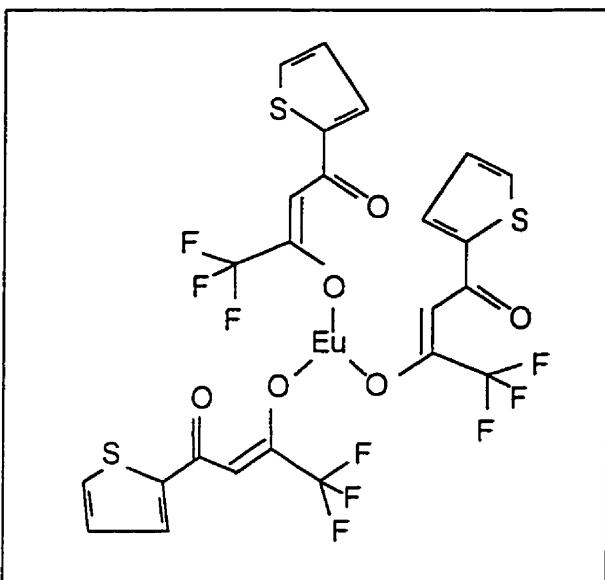


Figure 1.2. Structure moléculaire de l'EuTTA [30].

Le spectre d'émission de l'EuTTA comporte plusieurs pics correspondant à des transitions électroniques de l'eurogüm. Une raie à 612 nm est environ 20 fois plus intense que les autres. C'est à partir de cette fluorescence à 612 nm que les mesures thermiques sont prises. Les détails des spectres d'absorption et d'émission de l'EuTTA sont donnés dans la littérature [18].

Les processus de transfert d'énergie dans l'EuTTA ont été étudiés par Crosby et al. [31] et ils sont schématisés sur la figure 1.3. L'énergie absorbée sous 550 nm par le ligand (TTA) est transférée aux électrons de valence de l' Eu^{3+} qui se désexcitent selon deux phénomènes en compétition. D'une part, les électrons peuvent se désexciter à différents niveaux d'énergie plus bas et engendrer la fluorescence. La fluorescence à 612 nm est due à la désexcitation du niveau $^5\text{D}_0$ au niveau $^7\text{F}_2$. Les phénomènes de fluorescence sont en compétition avec une transition non-radiative activée par la chaleur ayant lieu du niveau $^5\text{D}_0$ de l' Eu^{3+} à un niveau triplet du ligand [27]. Cette compétition entre le transfert non-radiatif d'énergie et la fluorescence se reflète dans l'équation 1.2. À des

températures inférieures à $1/\gamma$, la température d'activation du processus non-radiatif, la fluorescence domine et le rendement quantique est quasi-constant à une valeur de $A-B$. Pour des températures supérieures à $1/\gamma$, la transition non-radiative gagne en importance et l'intensité de la fluorescence décroît alors de façon monotone.

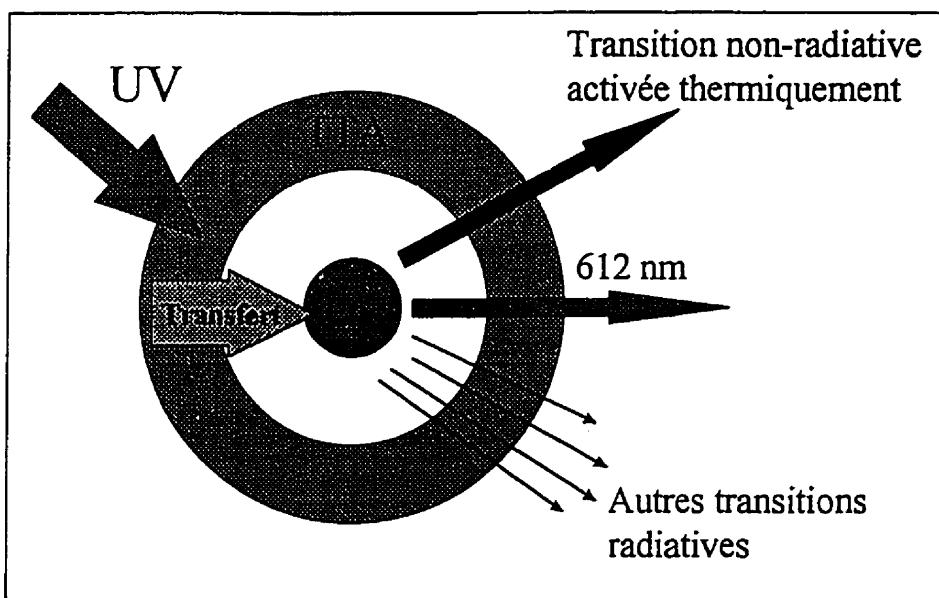


Figure 1.3. Processus énergétiques au sein de la molécule d'EuTTA.

1.3.4 Déposition du film d'EuTTA

La technique de déposition du film la plus commune consiste à mélanger de l'EuTTA à du polyméthylméthacrylate (PMMA) dans une solution. Le methyléthylketone (MEK) et le chlorobenzène (C_6H_5Cl) sont le plus souvent utilisés comme solvants. Le mélange est ensuite déposé par centrifugation sur l'échantillon jusqu'à évaporation du solvant. Dans le film obtenu, le PMMA forme la matrice et assure la résistance et l'uniformité du film. Après la centrifugation, il est courant de cuire l'échantillon à $125^{\circ}C$ pendant 30 minutes

afin d'obtenir une évaporation complète du solvant et d'obtenir une réponse stable au blanchiment (c.f. section 1.3.5).

Dans la littérature, un mélange consistant de 1,2% EuTTA, 1,8% PMMA et 97% (pourcentage massique) de solvant est le plus souvent utilisé. On rapporte qu'une centrifugation à 650 tours par minute permet d'obtenir un film de 300 nm d'épaisseur. On rapporte aussi qu'un film de cette épaisseur équivaut à 3,5 longueurs d'absorption optique à 365 nm. Le chapitre suivant montre toutefois qu'en appliquant cette recette nous obtenons des résultats différents. Il est nécessaire de varier la procédure afin d'optimiser la sensibilité et la précision des mesures thermiques.

Il est possible d'ajuster l'épaisseur des films en variant la concentration du solvant et la vitesse de rotation de la tournette (*spinner*). Afin d'obtenir des films épais, on peut même laisser le solvant s'évaporer sans effectuer la centrifugation. Dans la plupart des cas, les films ainsi obtenus sont moins uniformes. Toutefois, pour certaines géométries d'échantillon, la déposition sans centrifugation constitue la meilleure solution.

1.3.5 Blanchiment des films

Le blanchiment des films se manifeste comme une diminution de l'intensité de la fluorescence en fonction du temps d'exposition du film aux UV. L'intensité de la fluorescence peut chuter de plus de 50% pour une exposition aux UV de l'ordre de quelques minutes [25]. Pour un film recuit, l'intensité suit une décroissance monotone alors que le comportement est moins stable pour un film non-recuit [25]. Puisque chaque mesure nécessite une exposition du film aux UV de l'ordre

de 15 secondes et que plusieurs mesures sont souvent nécessaires au cours d'une même analyse, on ne peut négliger le blanchiment.

Le blanchiment du film est responsable de certains artefacts. Tel que décrit à la section 1.3.2, le profil thermique est obtenu par la division des images "froide" et "chaude" acquises successivement. Sur une région d'un échantillon où la température ne varie pas, ces images devraient être identiques. Toutefois, le blanchiment a pour effet de réduire l'intensité de l'image acquise en second lieu et crée ainsi l'apparence d'un chauffage uniforme du film. Le blanchiment peut aussi produire des artefacts complexes sur les surfaces où l'épaisseur du film varie. Une étude de la dépendance du blanchiment sur l'épaisseur du film est présentée au chapitre 2. Elle permet d'expliquer l'apparition des artefacts thermiques.

La photodégradation de la molécule d'EuTTA est responsable du phénomène de blanchiment [32]. L'absorption d'un photon énergétique par un polymère ou une molécule organique peut engendrer la scission de la chaîne principale de la molécule. La photodégradation peut être directe ou indirecte. Elle est directe lorsque la modification d'une molécule est engendrée par l'absorption d'un photon par cette même molécule. Elle est indirecte lorsque d'autres molécules au sein d'un polymère sont fragmentés et que ces fragments mènent à la scission de la molécule d'intérêt. Notons finalement que les phénomènes de photodégradation peuvent être dépendant de la température et qu'ils sont plus probables lorsque les phénomènes d'absorption et de transfert d'énergie impliquent des états triplets. Les transferts d'énergie menant à la fluorescence de l'EuTTA mettent en cause des niveaux triplets (c.f. section 1.3.3).

Les films utilisés pour FMI sont constitués d'un mélange d'EuTTA et de PMMA. Sous la base des considérations du précédent paragraphe, on peut imaginer une multitude de phénomènes plus ou moins complexes menant à l'observation du blanchiment. La scission (directe ou indirecte) de la molécule d'EuTTA peut changer les conditions de transfert d'énergie du ligand à l'ion Eu³⁺. La scission d'une molécule peut aussi rendre impossible toute absorption subséquente des UV.

CHAPITRE 2 Optimisation de la technique

Le chapitre précédent décrit les bases de l'imagerie thermique par fluorescence. Le présent chapitre met l'accent sur le travail de l'auteur. On y présente d'abord le montage expérimental utilisé au *Centre for Microanalysis de Nortel Networks*. Les mesures permettant de caractériser les films d'EUTTA/PMMA utilisés ainsi que les outils qui optimisent la sensibilité du système sont aussi présentés.

2.1 Montage expérimental

Peu de modifications furent nécessaires afin de permettre l'utilisation de l'imagerie thermique par fluorescence sur le microscope Zeiss LSM (*Laser Scanning Microscope*). Ce microscope très versatile permet d'effectuer de la microscopie d'émission, de la profilométrie en mode confocal, de l'imagerie dans le proche infrarouge, etc. Il est de plus équipé d'une lampe au mercure permettant la détection de particules organiques à la surface des dispositifs. Cette lampe constituera la source de rayons ultraviolets nécessaire en FMI.

La figure 2.1 présente le montage expérimental utilisé. La lampe au mercure illumine l'échantillon dont la fluorescence est captée par la caméra CCD (*charge-coupled device*). Un filtre d'excitation (*excitation filter*) permet de bloquer les longueurs d'ondes supérieures à 400 nm dans le spectre d'émission de la lampe au mercure.

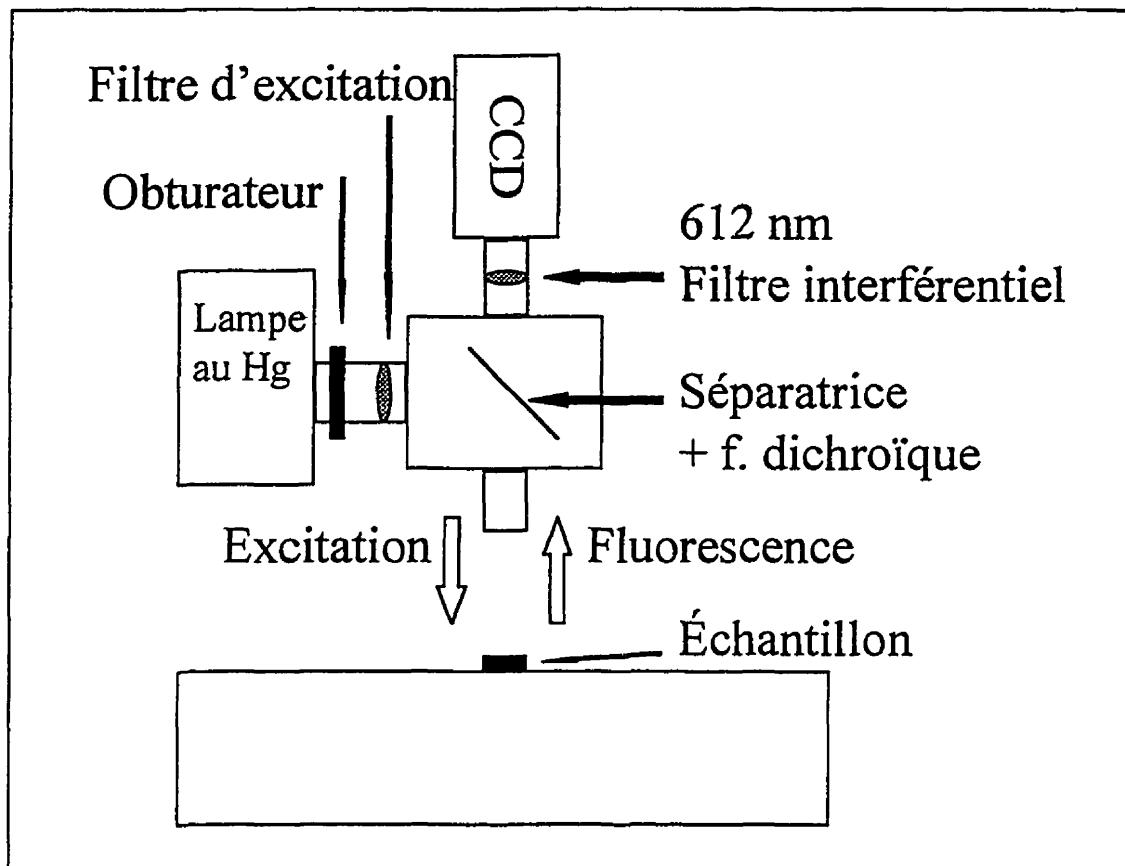


Figure 2.1. Montage expérimental.

Un filtre interférentiel à bande très étroite ($\pm 2 \text{ nm}$) et dont la transmission maximale est centrée à 612 nm permet de ne détecter que la fluorescence de l'EuTTA. On s'assure ainsi d'éliminer la majorité du bruit dû à la lumière blanche dans l'enceinte du microscope ou à la luminescence des dispositifs sous tension. Les recombinaisons électron-trou ayant lieu au sein des dispositifs (en particulier ceux de GaAs) peuvent en effet créer une intensité de lumière importante qu'il est nécessaire de bloquer pour obtenir les images FMI.

2.1.1 Stabilité du montage

Le microscope est équipé d'objectifs donnant des grossissements allant de 2,5X à 100X. L'utilisation d'une table optique permet d'isoler l'enceinte du microscope des vibrations environnantes. Le poids élevé du plateau du microscope entraîne toutefois celui-ci dans un lent désalignement vertical. Le plateau s'abaisse à un rythme de l'ordre de 0,1 à 0,5 μm par minute. La perte de foyer engendrée par ce mouvement n'est toutefois pas critique puisque les images froides et chaudes sont acquises successivement dans un laps de temps de l'ordre de 15 secondes. Il convient toutefois de réajuster le foyer à chaque 2 minutes environ.

2.1.2 Uniformité de l'éclairement UV

Tel que discuté à la section 1.3.2, l'image résultant de la division de deux images ne devrait pas dépendre de la distribution spatiale de l'intensité de l'excitation UV ($I(x,y)$). Toutefois, l'effet de blanchiment peut faire apparaître des artefacts thermiques dans l'image lorsque l'éclairement UV n'est pas uniforme. Dans les régions où l'éclairement est plus élevé, le blanchiment est plus important et l'apparence d'une élévation de température est créée sur le profil de température. Cet effet est en général peu important mais il peut compliquer l'analyse d'images où les variations de température sont faibles (de l'ordre de 0,1°C).

L'uniformité de l'éclairement peut être maximisée en ajustant l'alignement de l'ampoule et du miroir parabolique de la lampe au Hg. Cet alignement est stable et ne doit être refait que lors du remplacement de l'ampoule.

2.1.3 Système de la caméra CCD [33]

Le système utilise une caméra Photometrics AT200. Le détail des caractéristiques de ce système permet d'évaluer l'importance des différentes sources de bruit qui s'y rattachent ainsi que les opérations qui permettent d'optimiser sa sensibilité. Le système de la caméra comprend 4 éléments principaux: la tête de la caméra (CCD) montée directement sur le microscope (M), l'unité de contrôle (U.C.), l'unité de refroidissement (U.R.) et la carte d'acquisition de l'ordinateur du microscope. Le système est schématisé dans la figure 2.2.

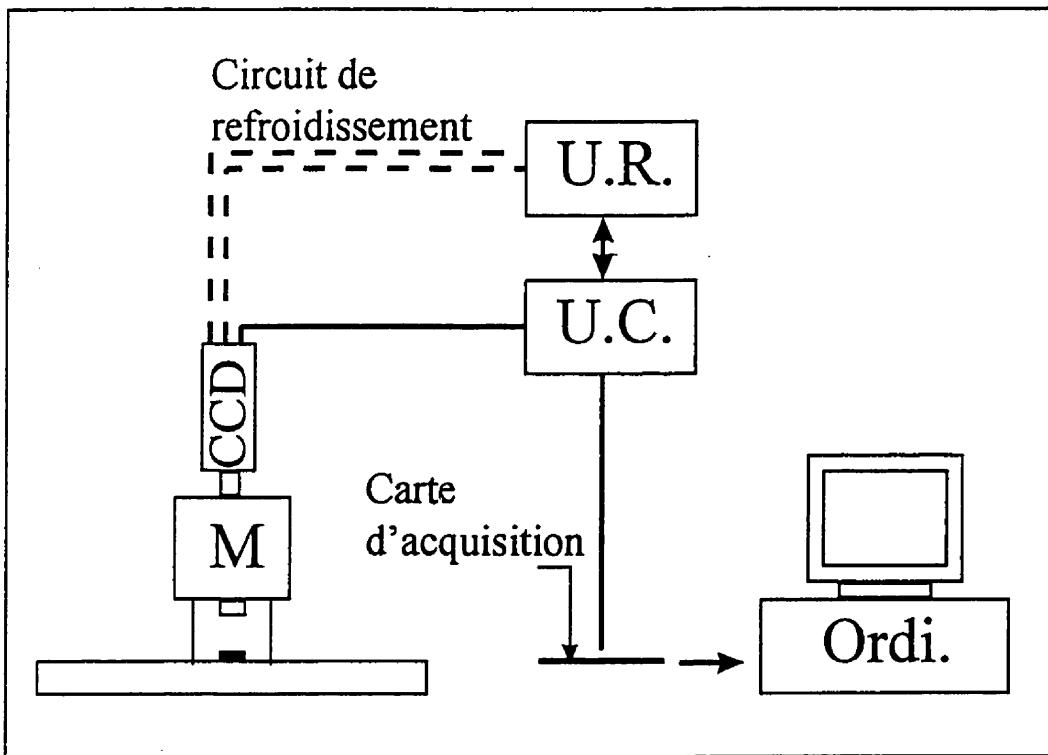


Figure 2.2. Système de la caméra.

La tête de la caméra contient une matrice carrée de 512 X 512 détecteurs de silicium. Chacun des éléments de détection (ou pixel) constitue un carré de 20

X 20 μm . Sous exposition lumineuse, et durant tout le temps d'acquisition déterminé par l'utilisateur, les charges s'accumulent dans les diodes de détection. La charge totale accumulée à chaque pixel, qui est représentative de l'intensité lumineuse en chaque point, est mesurée à la fin de l'acquisition. La résolution de la caméra dépend de la lentille utilisée. Pour l'objectif offrant le plus important grossissement (100X) on obtient une résolution maximale de 0,27 μm / pixel.

L'unité de contrôle (U.C.) produit les coups d'horloge et signaux nécessaires à l'acquisition des images générées dans la tête de la caméra. Elle est responsable de la transformation du signal et de son transfert de la tête à la carte d'acquisition ainsi que du contrôle de la température de la tête de la caméra. Un processeur analogique reçoit le signal de la tête, l'amplifie, le filtre et le numérise avant de le transmettre à la carte d'acquisition.

Un courant d'obscurité est généré par l'excitation thermique des électrons et constitue une source de bruit importante. L'unité de refroidissement (U.R.) a pour rôle de minimiser cette source de bruit. Elle utilise un système de refroidissement thermoélectrique qui maintient la tête de la caméra à -45°C environ. La circulation d'éthylène glycol entre la tête de la caméra et l'unité de refroidissement permet le transfert de la chaleur.

La carte d'acquisition gère les communications entre l'ordinateur contrôlant le microscope et le système de caméra. Le signal analogique provenant de la tête est converti par l'unité de contrôle sous 14 bits. C'est-à-dire que l'intensité lumineuse de chaque pixel peut prendre une des 16384 valeurs discrètes d'intensité. Puisque la carte d'acquisition ne peut gérer que des signaux à 8 bits, l'intervalle des 16384 valeurs est divisé en 256 valeurs. L'intensité de

chaque pixel ne peut donc être représentée et enregistrée que sous 256 tons de gris ce qui réduit la précision des valeurs d'intensité. À la section 2.4.2, on montre qu'il est possible de représenter sous 8 bits un sous-ensemble des 16384 valeurs obtenues par l'unité de contrôle afin d'augmenter la précision des lectures.

Le bruit quantique, le bruit du préamplificateur et le courant d'obscurité sont les trois principales sources de bruit du système d'acquisition. L'importance de chacune de ces sources de bruit dépend des conditions d'acquisition de l'image.

- i) Pour des sources de faible intensité, ne générant qu'une centaine d'électrons par pixel, le bruit du préamplificateur est dominant.
- ii) Dans le cas d'acquisitions de longue durée, le courant d'obscurité peut aussi jouer un rôle important. C'est le cas par exemple en microscopie d'émission.
- iii) Lorsque l'intensité lumineuse atteignant le détecteur est élevée, le bruit quantique constitue la source principale de bruit alors que le bruit du préamplificateur et le courant d'obscurité sont négligeables. C'est dans ce mode que s'effectue l'imagerie thermique par fluorescence. En effet, l'intensité UV utilisée et la haute efficacité quantique du processus de fluorescence assurent une émission de photons importante.

Le bruit quantique se manifeste dans tout phénomène de fluorescence. Les photons étant émis aléatoirement, l'intensité du signal recueilli à chaque échantillonnage (ou sur des pixels voisins), sous des conditions fixes et à une température donnée, n'est pas constante. Au fait, l'intensité du signal suit une distribution de Poisson. Le rapport signal/bruit qui est réduit par le bruit quantique peut être amélioré en utilisant un plus long temps d'acquisition, le moyennage d'images, le "*bining*" ou un filtre moyenneur.

Le "binning" consiste à combiner les charges de plusieurs éléments de détection adjacents (pixels) dont la charge totale est mesurée. Par exemple, le système utilisé permet un "binning" de 2X2. La charge totale de 4 pixels adjacents est donc mesurée et la matrice de l'image passe de 512 X 512 pixels à 256 X 256 pixels. Puisque 4 fois plus de charges sont acquises, en chaque pixel, le bruit quantique est diminué d'un facteur 2. De plus, le nombre de pixels à traiter par l'unité de contrôle est moindre et le temps d'acquisition est donc diminué considérablement. Il passe de 15 secondes environ, pour une acquisition normale, à environ 8 secondes lorsque le "binning" est utilisé. L'inconvénient majeur de cette technique est la diminution, par un facteur 2, de la résolution spatiale de la caméra qui passe alors à 0,54 µm / pixel pour un objectif de 100X.

2.2 Mesures des caractéristiques du film

Le rapport des concentrations de PMMA et d'EuTTA utilisé dans le mélange de base est d'une certaine importance. À très forte concentration de PMMA, des films très épais doivent être utilisés afin d'obtenir une fluorescence suffisante. Ceci peut réduire la résolution spatiale. À l'opposé, un film ne contenant pas suffisamment de PMMA a une consistance poudreuse et est friable. Des concentrations comparables de PMMA et d'EuTTA permettent d'obtenir les meilleurs films. Le rapport des concentrations n'est pas critique et il a été convenu d'utiliser les concentrations PMMA:EuTTA de 3:2 rapportées dans la littérature.

Le chlorobenzène a été sélectionné comme solvant puisque qu'un procédé de lithographie de *Norte*/ utilise une solution de PMMA dans du chlorobenzène.

Cette solution est facilement disponible et l'ajout de chlorobenzène pur et d'EuTTA permet d'obtenir la solution désirée.

Les premiers films furent préparés à partir de la solution proposée dans la littérature. Les films devaient toutefois être créés par centrifugation à des vitesses d'au moins 800 rpm puisque les films centrifugés à 650 rpm, vitesse suggérée dans la littérature, montraient une très mauvaise uniformité observable à l'oeil.

Les mesures présentées dans cette section permettent de comparer l'épaisseur et le coefficient d'absorption de nos films avec les résultats présentés dans la littérature. La connaissance du coefficient d'absorption permet de mieux comprendre et interpréter le comportement de la fluorescence du film. La valeur du coefficient d'absorption est utilisée à la section 2.3.

Afin de vérifier la validité des résultats, l'épaisseur des films créés et leur coefficient d'absorption ont été mesurés d'une part, par des mesures de transmission jointes à des mesures de profilométrie, d'autre part, par ellipsométrie.

2.2.1 Mesures de profilométrie et de transmission

La mesure de l'épaisseur d'un film jointe à une mesure de sa transmission permet de calculer le coefficient d'absorption. À une longueur d'onde λ particulière, le coefficient d'absorption du film (α) peut être obtenu à partir de la relation suivante:

$$\frac{\mathfrak{I}(\lambda)}{1 - \mathfrak{R}(\lambda)} = e^{-\alpha(\lambda)t} \quad (2.1)$$

où $T(\lambda)$ et $R(\lambda)$ représentent la transmittance et la réflectance du film à une longueur d'onde donnée et t , l'épaisseur du film.

Les mesures d'épaisseur ont été effectuées par profilométrie sur l'appareil DEKTAK du Groupe de recherche en physique et technologie des couches minces (GCM) à l'École Polytechnique. Cinq films ont été préparés partir de la même solution: 4 sur substrats de quartz et 1 sur substrat de silicium. Pour chacun des échantillons, la vitesse de révolution de la tournette diffère. Les films obtenus à des vitesses de centrifugation inférieures à 800 rpm, ont une très mauvaise uniformité et ne sont pas considérés ici. Les mesures d'épaisseurs, sont présentées au tableau 2.1. La précision sur les mesures est de l'ordre de ± 25 nm. Pour chacun des échantillons, les profils de topographie ont été enregistrés à trois positions différentes.

Tableau 2.1 Mesures d'épaisseur effectuées par profilométrie sur 5 échantillons.

Échantillon	Substrat	Vitesse de rotation (RPM)	Mesure d'épaisseur #1 (nm)	Mesure d'épaisseur #2 (nm)	Mesure d'épaisseur #3 (nm)	Moyenne des mesures (nm)
1	Quartz	1000	100	100	110	103
2	Quartz	800	100	110	100	103
3	Quartz	1200	100	80	90	90
4	Quartz	800	80	180	160	140
5	Si	1000	125	150	NA	138

La faible viscosité du mélange peut expliquer que la vitesse de rotation n'ait pas d'effet significatif sur l'épaisseur des échantillons. Les mélanges plus visqueux menant à des films plus épais montreraient une plus grande dépendance de l'épaisseur sur la vitesse de la tournette. Les films préparés sur le Si semblent

plus épais ce qui laisse présumer que la tension de surface entre la solution et ce substrat est plus importante que celle entre la solution et le quartz.

La transmittance et la réflectance des 4 échantillons sur quartz ont été mesurées sur la gamme de fréquences entre 200 nm et 850 nm à l'aide d'un spectrographe Perkin Elmer Lambda 19. L'échantillon sur le silicium n'est pas considéré puisqu'il n'est pas transparent à la radiation ultraviolette. La figure 2.3 montre les coefficients d'absorption, pour les quatre échantillons, entre 200 et 450 nm environ. À plus haute fréquence, le coefficient d'absorption est pratiquement constant sous $0,5 \mu\text{m}^{-1}$.

L'absorption du film est importante sur la gamme des fréquences entre 300 et 370 nm. Sur cette gamme de fréquence, la lampe au mercure montre trois pics d'émission principaux à 313 nm, 336 nm et 365 nm. Le spectre d'émission d'une lampe au mercure est présenté par Barton [6].

Le pic à 365 nm est le plus large et qu'il est environ deux fois plus intense que les deux autres, la valeur de l'absorption à cette fréquence donne une bonne approximation de la valeur intégrée. La valeur de α à 365 nm permet d'évaluer la longueur de pénétration ($1/\alpha$) des UV à 300 nm environ.

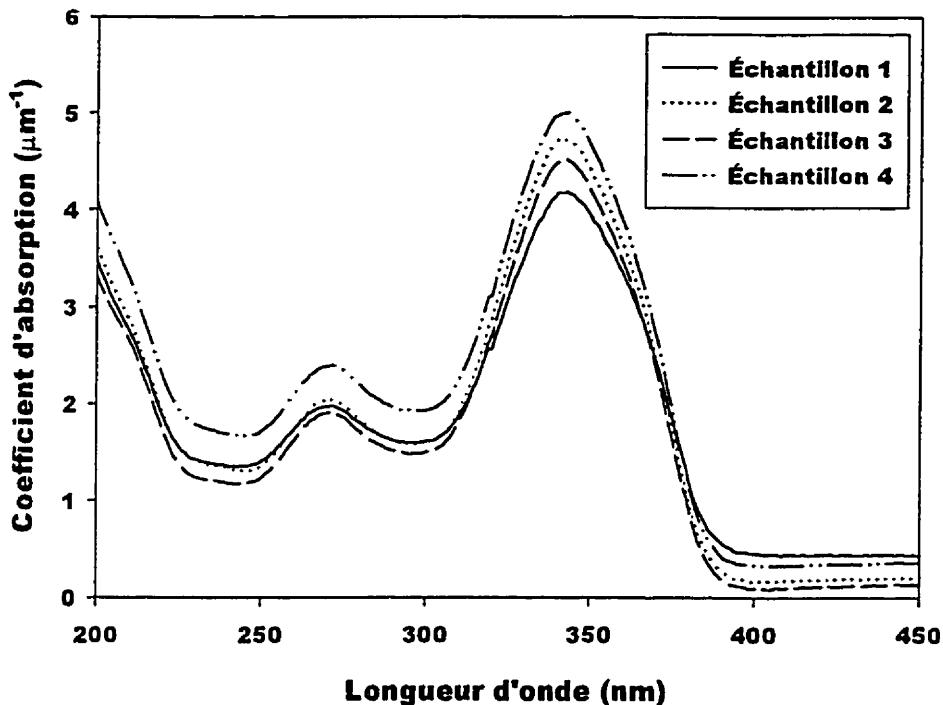


Figure 2.3. Spectre du coefficient d'absorption pour chacun des quatre échantillons sur quartz. Les films ont été préparés à partir d'une solution PMMA:EuTTA dans des proportions 3:2.

2.2.2 Mesures d'ellipsométrie

L'ellipsométrie, utilisée de paire avec un modèle numérique, permet d'évaluer l'épaisseur et l'indice de réfraction complexe d'une couche mince [34]. L'échantillon #1 a été étudié à l'aide d'un ellipsomètre J.A. Woollam. L'épaisseur du film évaluée par ellipsométrie est de 120 nm comparativement à 100 nm par profilométrie.

Le spectre de la partie réelle de l'indice de réfraction (n) est présenté à la figure 2.4. La valeur de n sera utilisée ultérieurement pour évaluer l'épaisseur des films par FTIR (c.f. section 4.1.2). Par ailleurs, le coefficient d'absorption est relié à la partie imaginaire de l'indice de réfraction (k) par la relation:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.2)$$

Le spectre du coefficient d'absorption mesuré par ellipsométrie est superposé à celui obtenu pour l'échantillon #1 par les mesures de transmission à la figure 2.5. Cette figure montre que les mesures du coefficient d'absorption obtenues selon les deux méthodes utilisées concordent.

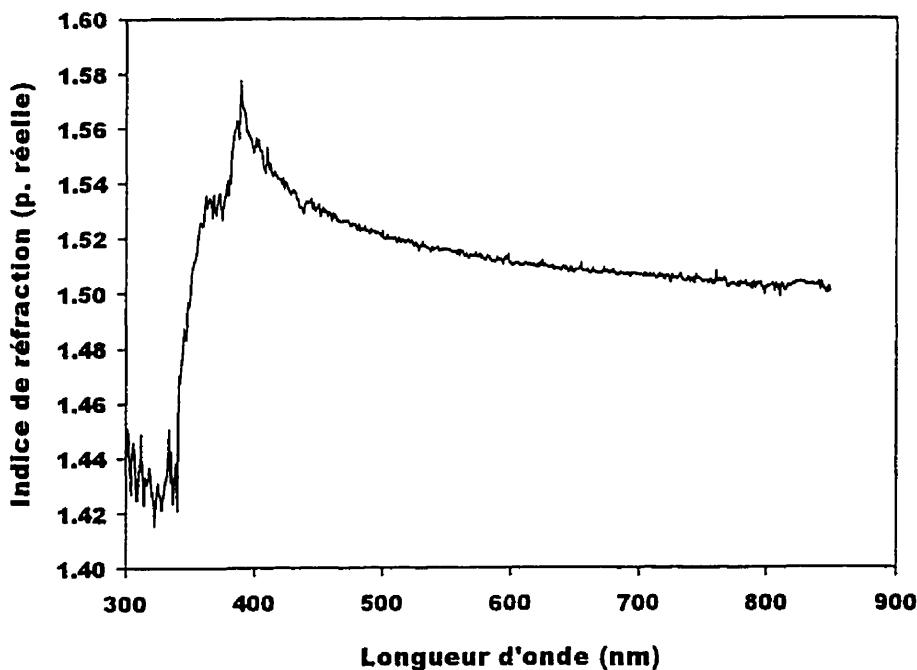


Figure 2.4. Spectre de l'indice de réfraction d'un film de PMMA:EuTTA mélangés dans des proportions de 3:2, tel que mesuré par ellipsométrie.

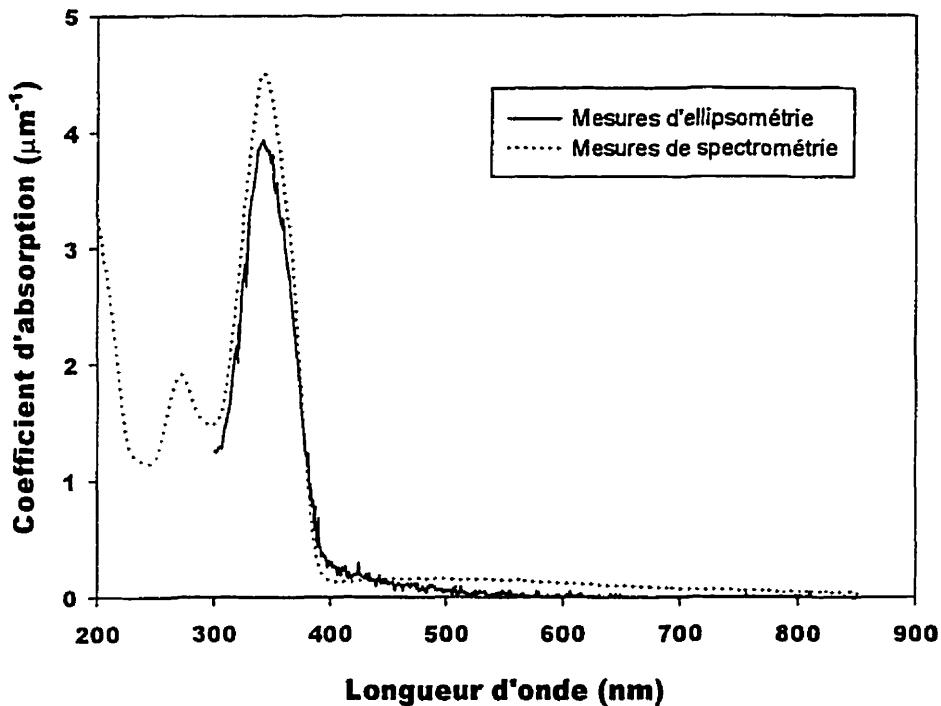


Figure 2.5. Superposition des spectres d'absorption mesurés par ellipsométrie et par les mesures de transmission (pour l'échantillon #1).

2.2.3 Discussion des mesures des caractéristiques du film

Il convient de comparer les caractéristiques de nos films avec ceux rapportés dans la littérature. La profilométrie et l'ellipsométrie évaluent l'épaisseur des films créés à 120 nm environ. Cette épaisseur est trois fois inférieure aux résultats rapportés dans la littérature où la même recette est utilisée (c.f. section 1.3.4). La composition moléculaire du PMMA, la mouillabilité et la géométrie de l'échantillon utilisé sont autant de facteurs qui peuvent expliquer la divergence des résultats. D'autre part, selon les résultats d'ellipsométrie et de transmission,

la profondeur d'absorption des films créés, à partir d'un mélange PMMA:EuTTA dans un rapport de 3:2, est d'environ 300 nm. C'est aussi 3 fois plus que le résultat rapporté dans la littérature. Afin d'obtenir une absorption complète du rayonnement d'excitation, l'épaisseur des films devrait être d'au moins 1 μm . Il est difficile d'expliquer ce désaccord entre les mesures puisqu'on ne mentionne pas les détails des échantillons et de la technique utilisés pour déterminer la longueur d'absorption dans la littérature. L'utilisation, dans nos travaux, d'un composé de PMMA différent, moins absorbant dans l'ultraviolet, peut expliquer que l'on mesure une longueur d'absorption supérieure.

Il est impossible de diluer le mélange EuTTA:PMMA dans une concentration de chlorobenzène inférieure à 97%. On ne peut donc espérer obtenir des films d'une épaisseur supérieure à 200 nm en effectuant une seule déposition par centrifugation. On peut envisager deux solutions. Des films plus épais peuvent être obtenus en effectuant plusieurs dépositions successives par centrifugation. On peut aussi laisser sécher plusieurs gouttes de la solution sans la centrifuger. Bien que cette technique procure des films moins uniforme, elle constitue celle qui est en général préférée.

2.3 Optimisation de l'épaisseur des films

La résolution spatiale des profils thermiques obtenus par FMI diminue avec l'épaisseur du film. Le calcul théorique présenté à l'annexe A1 prédit une augmentation linéaire de la largeur des distributions de température en fonction de l'épaisseur des films. D'autre part, la présente section montre que le blanchiment des films très minces engendre des artefacts spatiaux importants. L'épaisseur des films utilisés doit être optimisée afin d'obtenir des profils

thermiques d'une résolution spatiale satisfaisante et dépourvus d'artefacts spatiaux trop importants.

2.3.1 Dépendance du blanchiment sur l'épaisseur des films

La diminution de la fluorescence, résultant de la photodégradation du film exposé au rayonnement UV, dépend de l'épaisseur de ce dernier. Un film de PMMA:EuTTA (3:2) d'épaisseur variable a été créé afin d'étudier ce phénomène. Pour ce faire, on a recuit, pendant 30 minutes, une goutte de la solution à base de chlorobenzène déposée sur un substrat de Si. Le profil d'épaisseur du film a été mesuré par le décompte des franges d'égale épaisseur observées dans l'image créée par le microscope LSM utilisant un laser He-Ne ($\lambda = 633$ nm) comme source d'éclairement. La vue en coupe de la figure 2.6 montre le profil d'épaisseur du film. La pente du film est relativement constante et l'épaisseur varie de 0 à 3,5 μm environ.

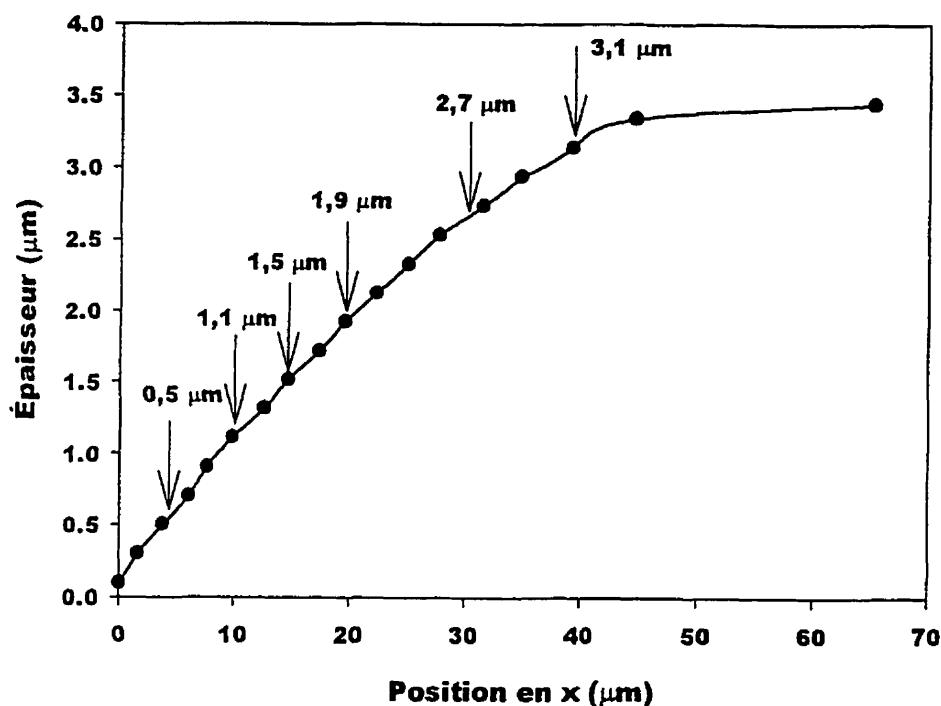


Figure 2.6. Vue en coupe du film utilisé pour étudier la dépendance du blanchiment sur l'épaisseur du film. L'épaisseur du film a été mesurée à partir des franges d'interférence du laser HeNe ($\lambda = 633 \text{ nm}$). Les flèches représentent les positions où les mesures d'intensité ont été prises.

La figure 2.7 montre comment l'intensité de la fluorescence varie en fonction du temps d'exposition aux UV pour 6 positions différentes sur le film. Ces positions, représentées sur la figure 2.6, correspondent à des épaisseurs de 0,5 μm , 1,1 μm , 1,5 μm , 1,9 μm , 2,7 μm et 3,1 μm . Les mesures d'intensité ont toutes été effectuées à la température de la pièce.

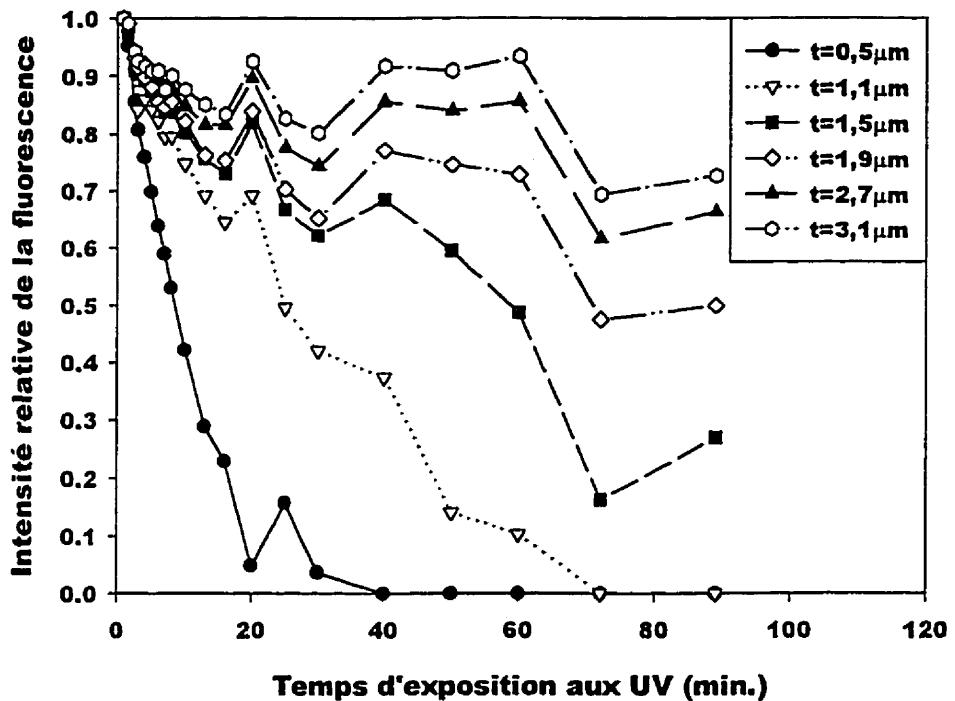


Figure 2.7. Effet de blanchiment observé en 6 régions du film correspondant à des épaisseurs de 0,5 μm , 1,1 μm , 1,5 μm , 1,9 μm , 2,7 μm et 3,1 μm . L'exposition aux UV est effectuée en utilisant la lentille de 100X. Toutes les mesures d'intensité sont acquises à la température de la pièce.

La décroissance de la fluorescence est plus importante pour les films minces. Il a été vérifié que la fluorescence disparaît totalement si le film est exposé suffisamment longtemps et ce, quelque soit son épaisseur. Toutes les courbes présentées à la figure 2.7 peuvent donc être extrapolées à une intensité nulle pour un temps d'exposition aux UV très long.

À un grossissement de 100X, la profondeur de champ est de l'ordre d'un micromètre. Étant donné que la surface montre une topographie de l'ordre de 3 μm , il est impossible de mettre au foyer l'ensemble de l'image. Idéalement, le foyer doit être maintenu à mi-hauteur (1,6 μm). L'instabilité du support du microscope nécessite qu'une remise au foyer soit effectuée régulièrement au cours de cette expérience. Les variations de la position du point focal sur l'échantillon, au cours de l'exposition aux UV et pendant l'acquisition des images, sont responsables des oscillations observées sur les courbes de la figure 2.7.

2.3.2 Variation de l'absorption en fonction du temps d'exposition aux UV.

La théorie générale sur la photodégradation des films présentée à la section 1.3.5 montre que le phénomène de blanchiment observé peut être le résultat d'une ou de plusieurs transformations des molécules d'EuTTA et de PMMA formant les films. L'objectif de ce travail n'est pas d'établir la nature exacte des réactions causant le blanchiment. Toutefois, on a pu montrer que l'absorption des UV diminue avec le temps d'exposition aux UV. Ceci nous permet de décrire le blanchiment de façon qualitative.

La figure 2.8 présente les spectres d'absorption de 3 échantillons exposés à la lampe au Hg pendant des périodes de 0 min., 30 min. et 60 min. Un film mince (≈ 150 nm) a été déposé sur une pastille qui a ensuite été recuite pendant 30 minutes et clivée pour former les différents échantillons. Les caractéristiques des films sont donc les mêmes sur chacun. Les échantillons ont ensuite été exposés au rayonnement UV sous la lentille de 5X pendant différentes périodes.

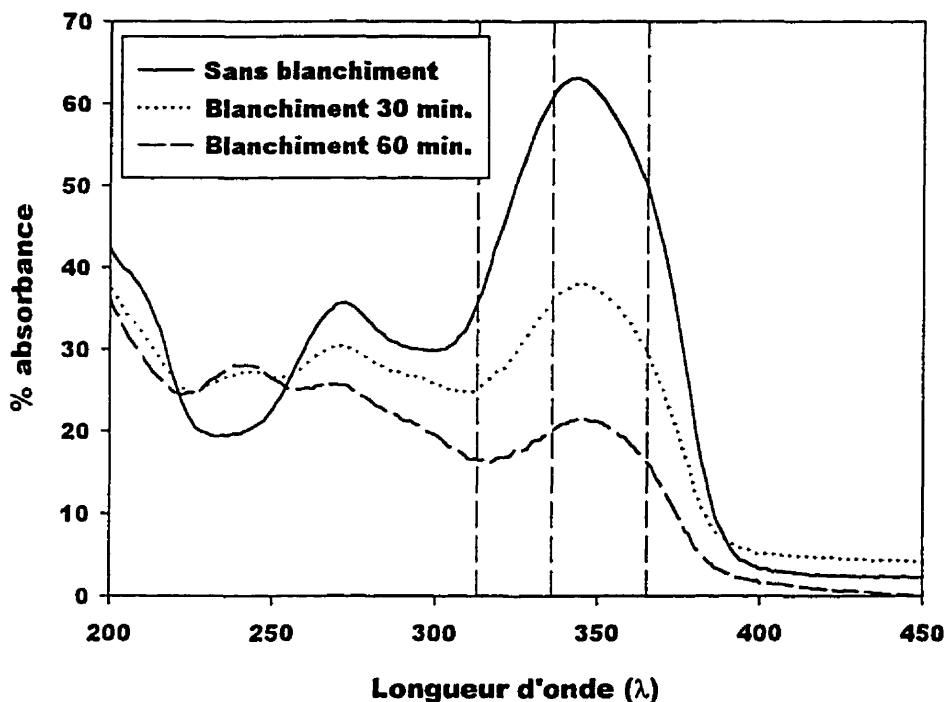


Figure 2.8. Spectres d'absorption (entre 200 et 450 nm) de 3 films EuTTA/PMMA. Les échantillons ont été exposés aux UV pendant 0 min., 30 min. et 60 min. Les trois lignes pointillées correspondent aux pics d'émission principaux de la lampe au mercure.

Sur la figure 2.8, le pic principal d'absorption, centré près de 345 nm, diminue significativement en fonction du temps d'exposition alors qu'un pic apparaît à 240 nm. L'apparition de nouvelles molécules, formées à partir des radicaux résultants de la scission, ou la modification des liens au sein des molécules de PMMA ou d'EuTTA, peuvent être responsables de l'apparition de ce pic.

La diminution de l'absorption près de 345 nm représente la diminution de l'absorption de l'EuTTA. En effet, la diminution de l'absorption par les molécules de PMMA engendrerait une augmentation, plutôt qu'une diminution, de la fluorescence avec le temps d'exposition.

Le rayonnement UV pénètre donc de plus en plus dans le film et excite des molécules d'EuTTA situées plus profondément. La figure 2.9 schématise l'intensité de la fluorescence émise en fonction de l'épaisseur pour différents temps d'exposition.

La forme exacte des courbes représentant la distribution de l'intensité en fonction de l'épaisseur est inconnue. L'aire totale sous ces courbes est proportionnelle à la fluorescence totale observée pour un film très épais. L'absorption de la lumière visible dans le film est très faible (c.f. figure 2.5) et elle peut être négligée. Une profondeur de pénétration de 0,3 μm , correspondant à la valeur mesurée à la section 2.2, est utilisée.

Dans le cas du film mince de 0,5 μm d'épaisseur représenté sur la figure 2.9, l'intensité de la fluorescence correspond à l'aire sous la courbe comprise entre les limites du film seulement (régions hachurées). Selon ce modèle, il est clair que la fluorescence diminue plus rapidement pour un film mince que pour un film épais.

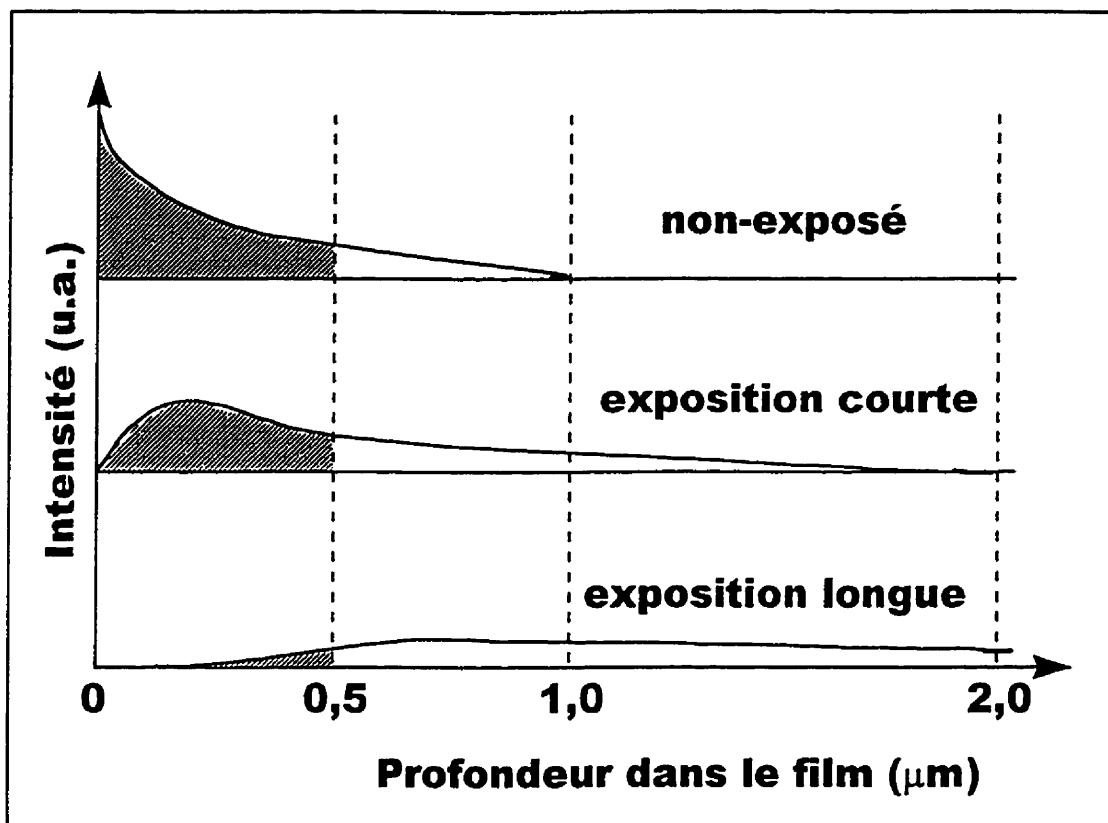


Figure 2.9. Distribution spatiale de l'intensité de la fluorescence en fonction du temps d'exposition aux UV. Les lignes verticales représentent les limites de films de 0,5 μm , 1 μm et 2 μm . L'aire sous la courbe hachurée est représentative de l'intensité totale de la fluorescence du film de 0,5 μm .

L'excitation UV est atténuée par les molécules de PMMA en pénétrant de plus en plus profondément dans le matériau. Une moins grande énergie sert alors à la fluorescence. C'est pour cela que l'aire totale sous les courbes diminue en fonction du temps d'exposition. Selon ce modèle, même les films très épais perdront leur fluorescence éventuellement.

Un modèle quantitatif reproduisant les courbes expérimentales présentées à la figure 2.7 devrait tenir compte de la variation de l'absorption en fonction du temps d'exposition en chaque point de l'échantillon. Cette variation est due à la

détérioration des molécules d'EuTTA et à l'atténuation par les molécules de PMMA. Un tel modèle est complexe et nécessite une résolution numérique. Le modèle qualitatif présenté suffit à comprendre le phénomène du blanchiment et les artefacts engendrés par la non-uniformité des films.

2.3.3 Conclusion

L'étude précédente montre que le blanchiment du film s'effectue plus rapidement dans le cas de films minces. Les courbes expérimentales suggèrent que la diminution de la fluorescence est attribuable à une diminution de l'absorption des UV par les molécules d'EuTTA. Le rayonnement ultraviolet pénètre de plus en plus dans le film et excite des molécules d'EuTTA situées plus profondément. Même les films très épais finissent par perdre leur fluorescence.

Les films très minces permettent d'obtenir une bonne résolution spatiale puisqu'ils limitent la diffusion thermique. Toutefois, le blanchiment de ceux-ci est plus important. L'intensité de la fluorescence des films minces diminue donc très rapidement et leur non-uniformité engendre des artefacts spatiaux importants. À l'inverse, les films épais offrent une moins bonne résolution spatiale mais ils présentent moins d'artefacts spatiaux et permettent d'obtenir une intensité de fluorescence adéquate pendant une plus longue période. L'utilisation de films d'environ 1 μm d'épaisseur est optimale.

2.4 Optimisation de la sensibilité de la technique

Quatre moyens permettant de maximiser la sensibilité de technique seront décrits:

- Déposition d'un film épais et uniforme
- Optimisation du temps d'acquisition et expansion de dynamique
- Moyennage d'images ou de ratio d'images
- Utilisation d'un filtre moyenneur

2.4.1 Déposition d'un film épais et uniforme

Tel que discuté à la section précédente, la déposition d'un film d'environ 1 μm est optimale. Si un film plus mince est utilisé, on s'assurera de le déposer le plus uniformément possible.

2.4.2 Optimisation du temps d'exposition et expansion de dynamique

Puisque le bruit quantique est aléatoire et qu'il suit une distribution de Poisson, le rapport signal sur bruit diminue selon la racine carrée du nombre de photons acquis. Une acquisition d'image longue permet donc d'améliorer l'image. Pour une caméra CCD, le temps d'acquisition est limité par la saturation de la charge des détecteurs. L'optimisation du temps d'exposition consiste donc à utiliser le plus long temps d'acquisition tout en évitant la saturation des détecteurs.

La résolution des images acquises par la caméra et numérisées par l'unité de contrôle est de 14 bits/pixel (16384 tons de gris). Toutefois, la carte d'acquisition ne permet de traiter que des images sous une résolution de 8 bits (256 tons de gris) (c.f. section 2.1.3). L'expansion de dynamique de

l'histogramme consiste à déterminer un sous-intervalle des intensités acquises sous 14 bits qui sera acquis et traité sous 8 bits. Les figures 2.10 et 2.11 illustrent comment s'effectue l'expansion de dynamique, contrôlée par le logiciel du microscope, selon que la mesure thermique effectuée est qualitative (i) ou quantitative (ii).

- i) Pour la localisation d'un point chaud, seule une mesure qualitative d'élévation de température est nécessaire. La figure 2.10 montre comment la sensibilité de la technique peut être augmentée dans ce cas. Dans l'exemple illustré, la situation initiale est la suivante (image 2.10a)): l'intensité des pixels de l'image varient entre 3000 et 8000 (sur une échelle de 14 bits) pour un temps d'acquisition donné. Dans un premier temps, on optimise le temps d'exposition tel qu'illustré en b) (dans ce cas, il faut le doubler). Ensuite, l'expansion de dynamique permet d'utiliser tout l'intervalle des niveaux de gris disponibles sur le système d'acquisition. Dans la situation b), les 256 tons de gris sont répartis sur tout l'intervalle de 14 bits. Seuls 156 des 256 niveaux de gris sont utiles alors que dans la situation c) l'information se trouve sur l'ensemble des 8 bits.

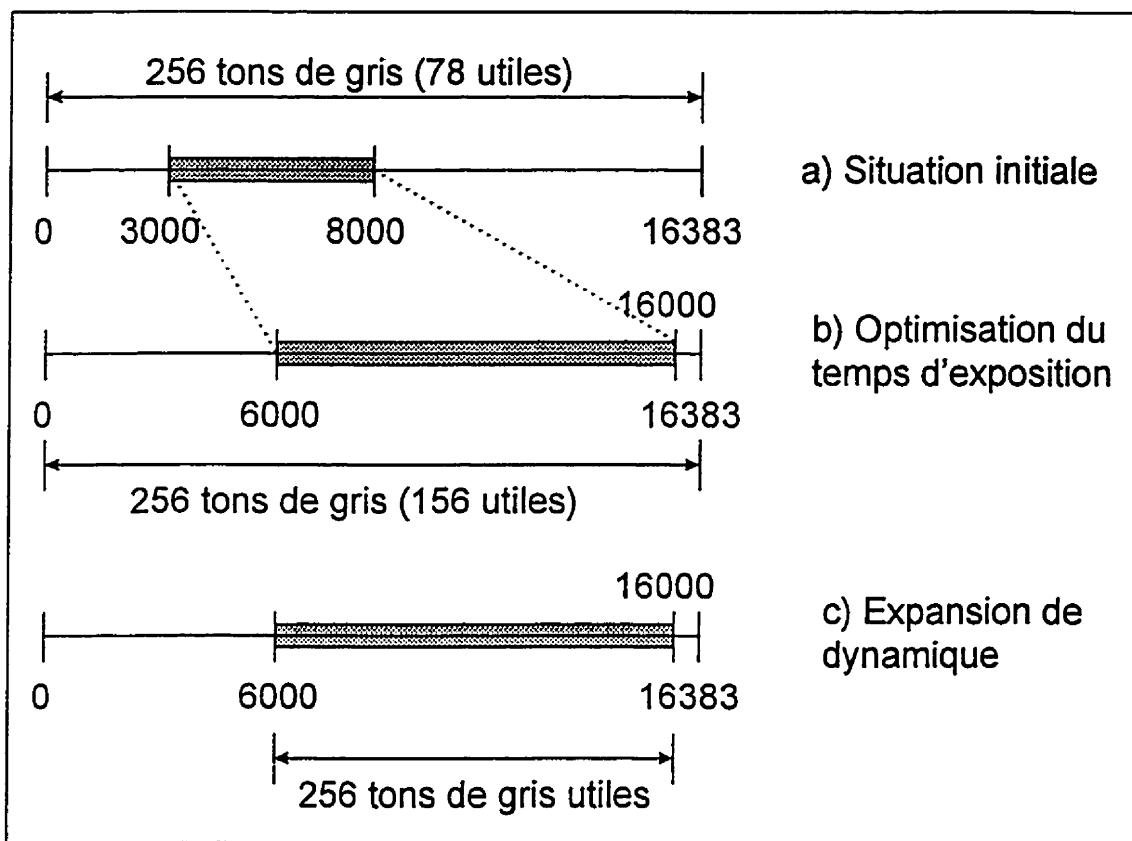


Figure 2.10. Optimisation du temps d'exposition (b) et expansion de la dynamique (c) pour des mesures qualitatives d'élévation de température.

- ii) Dans le cas où une lecture quantitative de la variation de température est nécessaire, l'expansion de dynamique ne peut être appliquée qu'à la borne supérieure de l'intensité tel que présenté à la figure 2.11. En effet, puisque dans ce cas la division d'images est requise, l'intensité doit être traité de façon absolue et le premier bit 0 d'information doit donc toujours correspondre à une intensité nulle de lumière. Seule la situation en c) diffère du cas illustré à la figure 2.10. Dans cet exemple, seulement 160 tons de gris contiendront l'information.

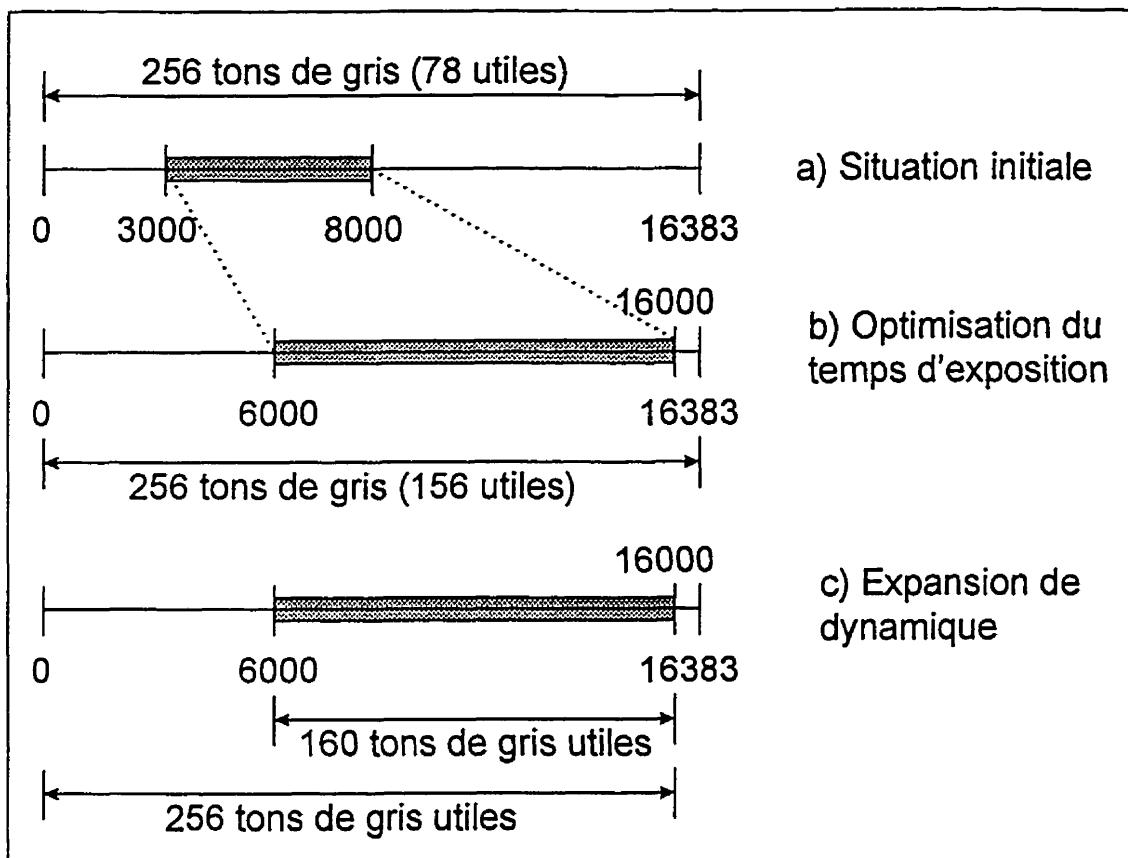


Figure 2.11. Optimisation du temps d'exposition (b) et expansion de la dynamique (c) pour des mesures quantitatives d'élévation de température.

2.4.3 Moyennage

La saturation des détecteurs de la caméra CCD limite le temps d'acquisition. En général, celui-ci s'étend de 0,1 sec. à 5 sec et dépend principalement de la lentille utilisée, de l'épaisseur du film et de la réflectivité de l'échantillon observé. Afin d'augmenter davantage le temps d'acquisition, et par conséquence de réduire le bruit, il est nécessaire d'acquérir plusieurs images et d'en faire la moyenne. Soit $F(x,y)$, l'intensité d'une image, on a:

$$F(x,y) = g(x,y) + \beta(x,y) \quad (2.3)$$

où $g(x,y)$ représente l'intensité du signal contenant l'information et $\beta(x,y)$ est le bruit aléatoire additif. La variation de température (ΔT) est donnée par la division d'une image "froide" (F_f) par une image "chaude" (F_c). En utilisant l'équation 1.4, on peut donc s'écrire:

$$\Delta T \propto \ln\left(\frac{F_f}{F_c}\right) \propto \ln\left(\frac{g_f + \beta_f}{g_c + \beta_c}\right) \quad (2.4)$$

où β est aléatoire.

Le moyennage d'images peut être fait de différentes façons. Les trois cas suivants sont traités:

- i) Moyenne de plusieurs images froides (F_f) et de plusieurs images chaudes (F_c), séparément, avant la division F_f / F_c .
- ii) Moyenne de plusieurs ratios F_f / F_c .
- iii) Filtrage médian sur les images individuelles F_f et F_c suivi d'un moyennage des ratios F_f / F_c .

La figure 2.12a) montre une structure chauffante analysée par FMI. Elle apparaît comme deux motifs rectangulaires formés par 5 lignes résistives parallèles. La figure 2.12b) présente le profil thermique obtenu pour un seul ratio F_f / F_c . L'image est obtenue en augmentant le contraste et les intensités observées ne correspondent pas directement au ratio F_f / F_c . Pour le calcul du rapport signal/bruit, les ratios F_f / F_c sont toutefois directement considérés.

La largeur à mi-hauteur (Γ) de la distribution des ratios des intensités dans la région marquée U sur la figure 2.12b) est de 0,027. Cette valeur est représentative de l'intensité du bruit. La valeur médiane de cette distribution (Θ) vaut 0,998. Idéalement, deux images acquises à la même température devraient être identiques et leur ratio devrait être égal à 1. Ici, Θ diffère de

l'unité à cause du blanchiment. La valeur de Θ est supérieure à 1 dans les cas où l'image froide est acquise avant l'image chaude et inférieure à 1 dans le cas contraire. L'intensité du signal, pour sa part, est donnée par la valeur médiane (Ω) dans la région V corrigée pour le signal de fond (Θ). Le rapport signal/bruit (Y) peut être évalué par:

$$Y = \frac{\Omega - \Theta}{\Gamma} = \frac{1,004 - 0,976}{0,027} = 1,04 \quad (2.5)$$

Le rapport signal/bruit ainsi obtenu sert de base de comparaison pour les cas traités ci-bas.

i) L'équation 2.4 suggère que le bruit sur ΔT peut être minimisé en réduisant séparément les composantes de bruit sur F_r et F_c . Ceci peut être réalisé en faisant successivement la moyenne de plusieurs images froides et celle de plusieurs images chaudes avant d'effectuer le ratio d'images. L'image \bar{A} obtenue en moyennant N images F , présente un ratio signal sur bruit $N^{1/2}$ fois plus élevé que pour chacune des images F .

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_N F_i = \frac{1}{N} \sum_N (g + \beta_i) = g + \frac{1}{N} \sum_N \beta_i = g + \bar{\beta}, \quad \text{avec } \bar{\beta} = \frac{\beta_i}{\sqrt{N}} \quad (2.5)$$

Ici, $\bar{\beta}$ représente le bruit additif résultant du moyennage des N échantillons.

et donc
$$\Delta T \propto \ln\left(\frac{\bar{F}_r}{\bar{F}_c}\right) \propto \ln\left(\frac{g_r + \bar{\beta}_r}{g_c + \bar{\beta}_c}\right) \quad (2.6)$$

La figure 2.12 c) montre que cette procédure n'améliore pas le rapport signal/bruit et contribue à accentuer significativement les artefacts. Le blanchiment du film et la perte de foyer du système empêchent de comparer (à travers le moyennage) des images acquises dans un long intervalle de temps. Seul le ratio d'images F_r et F_c acquises successivement permet d'obtenir une image représentative de ΔT .

- ii) Il convient donc de considérer les images acquises successivement comme étant pairees. On peut alors faire la moyenne des ratios F_f / F_c .

$$\overline{\left(\frac{F_f}{F_c}\right)} = \frac{1}{N} \sum_N \frac{g_f + \beta_f}{g_c + \beta_c} \quad (2.7)$$

La figure 2.12 d) est obtenue par le moyennage de 16 ratios d'images. Dans ce cas, le rapport signal/bruit, tel que mesuré, est amélioré par un facteur de 2,4 environ.

- iii) Le moyennage présenté en i) ne permet pas d'éliminer efficacement chaque composante du bruit sur F_f et F_c . On peut appliquer un filtre médian à chaque image afin de réduire le bruit sur chaque composante. Le filtre médian utilise une fenêtre carrée de pixels qui est déplacée point par point sur toute l'image. À chaque position, la valeur de l'intensité du pixel central de la fenêtre est remplacée par la valeur médiane des intensités de tous les pixels formant la fenêtre. Le logiciel d'analyse d'images du microscope Zeiss LSM permet d'appliquer ce filtre sur les images acquises par FMI. Le filtre peut utiliser des fenêtres de 3X3, 5X5 ou 7X7 pixels. Les matrices plus grandes permettent d'éliminer le bruit davantage au dépend de la résolution spatiale.

Un filtre médian utilisant une matrice 3X3 a été appliqué sur la paire d'images F_f et F_c utilisée pour former l'image 2.12 b). Le rapport signal/bruit du ratio F_f / F_c , initialement égal à 1,04, est augmenté à 1,21 après filtrage.

Le moyennage de ratio d'images peut être effectué après l'opération de filtrage. Le moyennage des 16 ratios F_f / F_c effectué après le filtrage individuel (matrice 3X3) des images permet d'augmenter le rapport signal sur bruit à 2,6 environ.

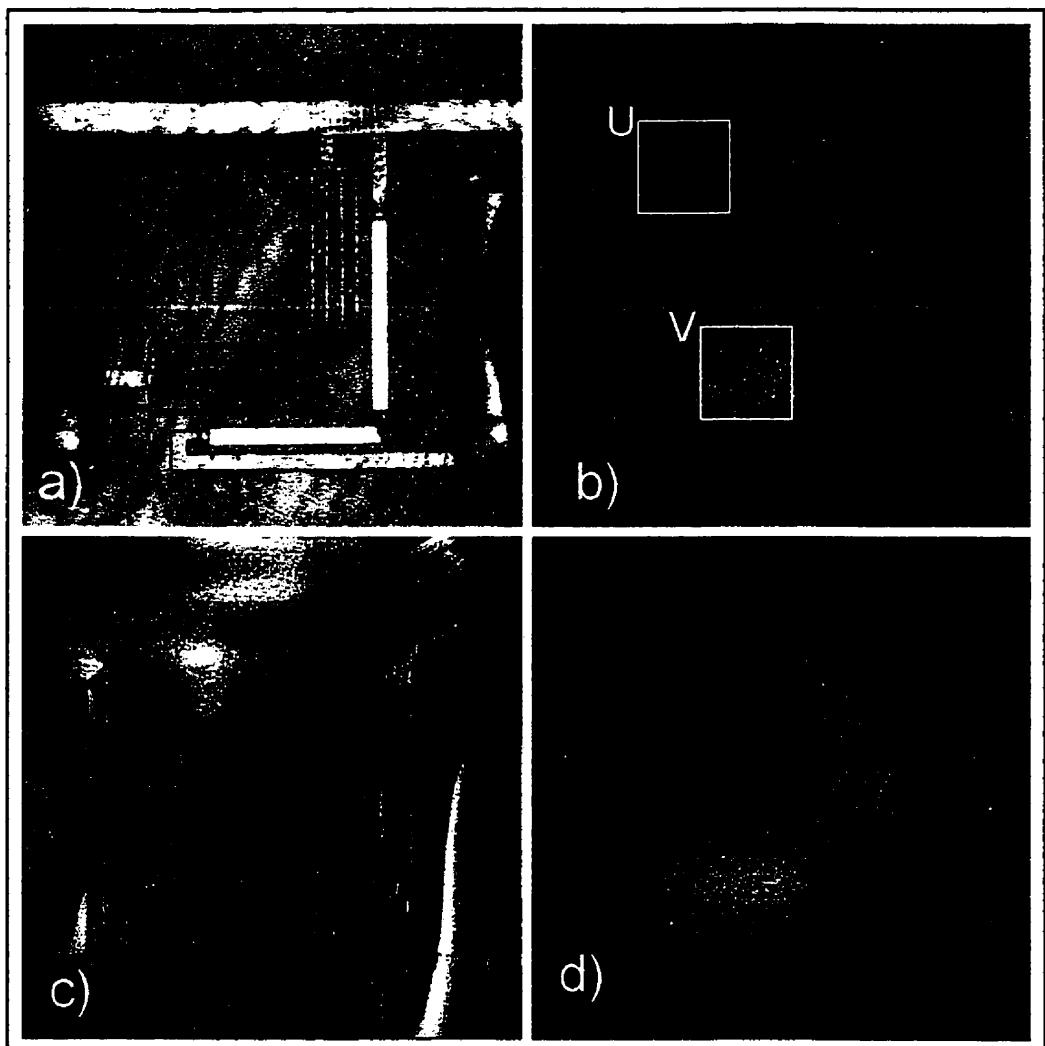


Figure 2.12. Structure résistive utilisée pour évaluer l'effet du moyennage d'images. Deux motifs rectangulaires formés de 5 lignes résistives, clairement distinguables sur l'image a) sont mis sous tension. L'image b) représente l'image thermique obtenue pour l'acquisition d'une seule paire d'images F_f / F_c . L'image c) est obtenue après le moyennage des images "froides" et "chaudes" effectué séparément. Le signal thermique est dissimulé, les artefacts spatiaux sont très importants. L'image d) tirée de la moyenne de 16 ratios F_f / F_c présente le meilleur rapport signal/bruit.

Le tableau 2.2 résume les améliorations du rapport signal/bruit obtenues, pour l'exemple particulier traité ici, par chacun des traitements détaillés ci-haut. Les résultats sont comparés au ratio F_r / F_c des deux images non-traitées.

Tableau 2.2. Améliorations du rapport signal sur bruit obtenues par différentes opérations de moyennage et par filtrage.

Traitement effectué	Rapport signal/bruit du ratio F_r / F_c final	Augmentation du ratio signal/bruit
Aucun (1 paire d'images F_r et F_c)	1,04	--
Moyennes des images F_r et F_c effectuées séparément.	L'image finale contient énormément d'artefacts	--
Moyenne des 16 ratios F_r / F_c sans filtrage	2,5	2,4
Filtrage médian (3 X 3) séparé des images F_r et F_c (1 paire).	1,21	1,2
Filtrage médian (3 X 3) de toutes les images suivi de la moyenne de 16 ratios.	2,54	2,4

Le moyennage de 16 ratios F_r / F_c permet d'améliorer le bruit d'un facteur de 2,4. Notons que l'acquisition des 32 images nécessaires à ce moyennage prend environ 15 minutes. Ce traitement est donc relativement fastidieux et n'est, en général, qu'utilisé pour accentuer le détail sur un profil thermique dont le signal ne peut être amélioré en augmentant la dissipation d'énergie de la structure. L'utilisation de moins de 16 ratios d'images permet de réduire le temps d'analyse mais le gain signal/bruit n'est pas significatif. Notons finalement que

le filtrage médian (3 X 3) ne permet pas d'augmenter significativement le rapport signal/bruit.

2.5 Conclusion sur l'optimisation de la technique

Les mesures de transmission et l'étude du blanchiment en fonction de l'épaisseur permettent de déterminer que l'épaisseur optimale des films est d'environ 1 μm . Pour des épaisseurs inférieures, l'intensité de la fluorescence est plus faible et les artefacts spatiaux créés par le blanchiment sont importants. Par contre la résolution spatiale de la technique sera réduite si des films trop épais sont utilisés. En général, afin de déposer des films de 1 μm d'épaisseur, on déposera les films en laissant sécher quelques gouttes de la solution EuTTA:PMMA:C₆H₅Cl sur les dispositifs. Il est possible de vérifier l'épaisseur moyenne du film à partir des franges d'interférence obtenues sur un appareil FTIR par exemple. Cette technique est décrite à la section 4.1.2.

Dans tous les cas d'analyse thermique utilisant FMI, il est nécessaire de maximiser le temps d'acquisition des images de façon à compter le plus de photons possible sans saturer les détecteurs du CCD. On augmente aussi la sensibilité de la technique en utilisant l'expansion de dynamique. Le gain en sensibilité peut être très significatif surtout lors d'analyse thermique qualitative, c'est-à-dire lors de la détection de points chauds.

Lorsqu'un signal très faible doit être analysé, le moyennage de ratios d'images F_r / F_c permet d'augmenter le rapport signal/bruit. L'utilisation de 16 ratios F_r / F_c est suggérée puisqu'elle permet d'améliorer le signal dans des temps raisonnables.

CHAPITRE 3 Mesures absolues de température

Selon, l'équation 1.1, il est possible de calibrer le système afin de relier l'intensité de la fluorescence à $Q(T)$, et donc à la température absolue de l'échantillon. Cette procédure requiert la connaissance des paramètres l , η et r et l'invariance de ceux-ci est essentielle à la reproductibilité des résultats. Le chapitre précédent montre que l'absorption, et donc η , varie en fonction de l'exposition du film aux UV. De plus, puisque la réflectivité varie d'un matériau à l'autre, une calibration devrait être effectuée pour chaque type d'échantillon. Cette approche ne permet donc pas d'obtenir efficacement des mesures absolues de température.

Une mesure de la température absolue (T_A) peut être obtenue en additionnant la variation relative de température (ΔT), obtenue par la division des images de fluorescence, à la température (T_f) de l'échantillon lors de l'acquisition de l'image "froide". En considérant les incertitudes δT_f et $\delta \Delta T$ sur les mesures, on peut écrire:

$$T_A + \delta T_A = (T_f + \delta T_f) + (\Delta T + \delta \Delta T) \quad (3.1)$$

La procédure permettant de calibrer la technique afin d'obtenir la mesure de ΔT est présentée dans ce chapitre. T_f , δT_f et $\delta \Delta T$ sont aussi évalués. Des mesures absolues de température sont effectuées sur des transistors bipolaires de GaAs et les lectures sont comparées à celles obtenues par la technique employant des cristaux liquides.

3.1 Calibration de la technique de FMI

La calibration permet de relier la variation d'intensité de la fluorescence à la variation de température (ΔT) de l'échantillon sous tension. La méthodologie utilisée et l'interprétation de la courbe de calibration obtenue pour un mélange effectuée pour une solution PMMA:EuTTA:C₆H₅Cl (1,2%:0,8%:98%) sont données dans ce qui suit.

3.1.1 Méthodologie

Dans un premier temps, il convient de mesurer précisément l'effet du blanchiment dans les conditions qui seront utilisées pour la calibration. Un film d'environ 1 µm est déposé sur un échantillon de Si que l'on brise en deux après un recuit de 30 minutes. Une moitié sert à l'étude du blanchiment, l'autre, à la calibration elle-même. La figure 3.1 présente la variation de la fluorescence de l'échantillon en fonction du temps d'exposition aux UV.

La lentille de 5X est utilisée pour établir cette courbe et la courbe de calibration. La décroissance de l'intensité est plus importante au début de l'exposition aux UV . Dans ce cas, la courbe peut être considérée linéaire après dix minutes d'exposition environ. Dans cette région de la courbe, la décroissance de la fluorescence est de l'ordre de 1% / minute d'exposition. Pour la calibration, une préexposition de 10 minutes du film est donc effectuée afin de se situer sur cette région de la courbe.

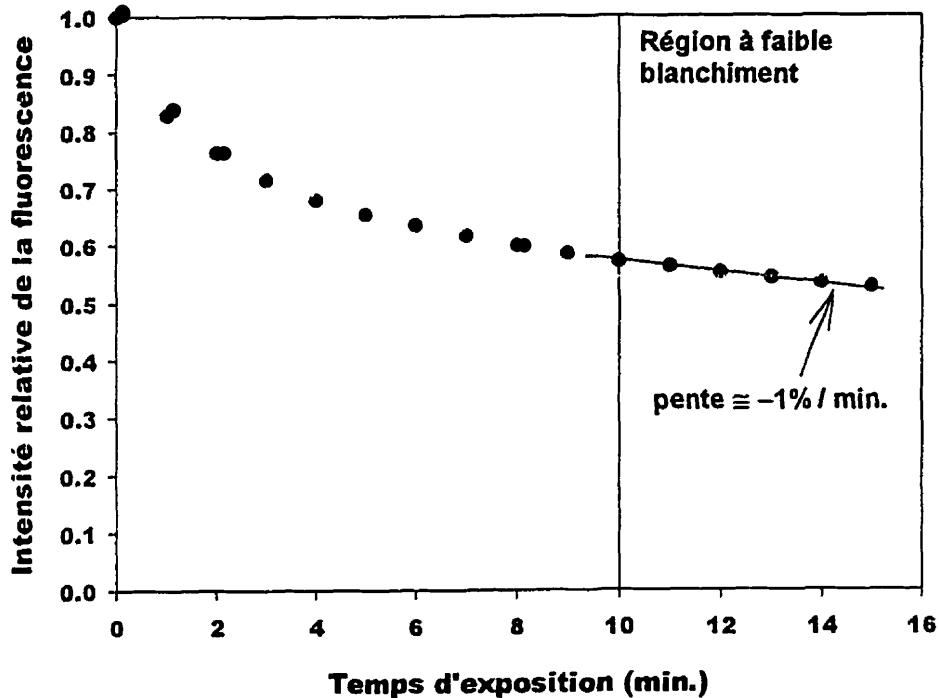


Figure 3.1. Variations relatives de l'intensité de la fluorescence en fonction du temps d'exposition aux UV.

La technique de binning (voir la section 2.1) permet d'acquérir les images nécessaires à la calibration tout en minimisant le temps s'écoulant entre l'acquisition de deux images successives. Le blanchiment est alors minimum. Cette technique est avantageusement utilisée pour la calibration puisqu'ici la résolution spatiale n'est pas importante. Seule l'intensité moyenne de chaque image est utilisée. L'acquisition des images prend en moyenne 8 secondes en mode "binning". Une correction pour le blanchiment de 0,13% de l'intensité est donc appliquée pour chaque image. Par exemple, les intensités sur la sixième image acquise après l'image de référence seront corrigées de 0,78 %.

La figure 3.2 présente le montage utilisé pour effectuer la calibration. L'échantillon de silicium sur lequel le film fluorescent a été déposé repose sur une plaque chauffante sous le microscope (M). La température de la plaque chauffante peut être contrôlée avec une précision de l'ordre de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Les lectures de la température du film sont effectuées grâce à un thermocouple (TC) placé à la surface de l'échantillon de Si. Une pâte conductrice est utilisée afin d'assurer un bon contact thermique entre l'échantillon et la plaque chauffante de même qu'entre le thermocouple et l'échantillon.

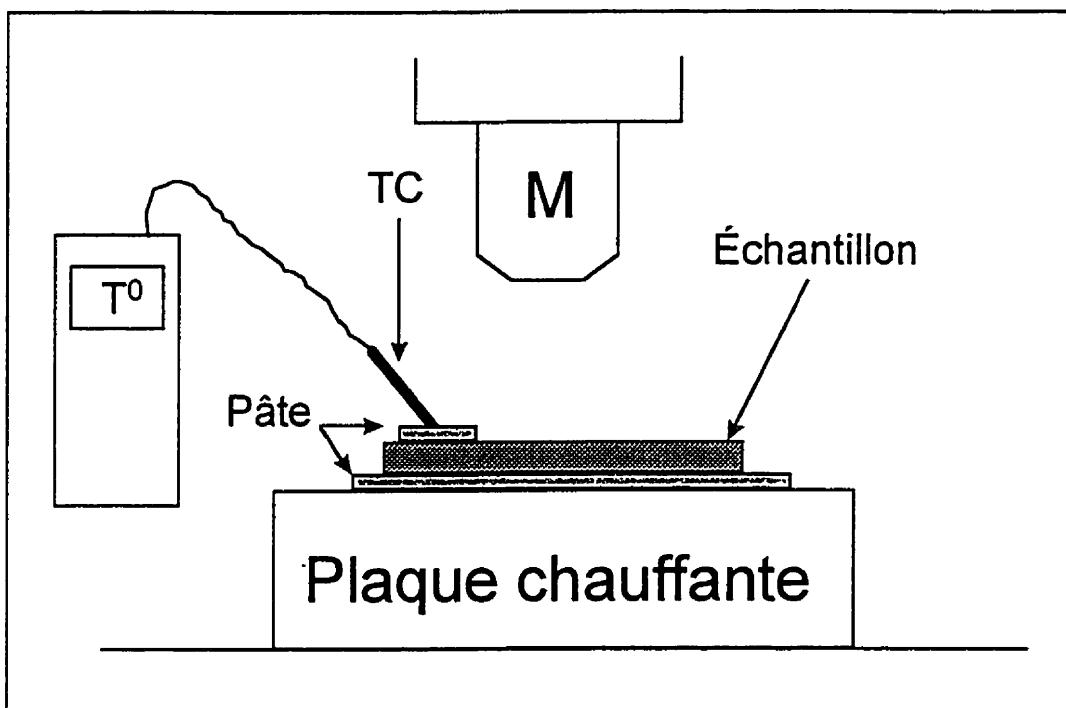


Figure 3.2. Montage utilisé pour la calibration. Une pâte à haute conduction thermique est utilisée pour assurer un bon échange de chaleur entre la plaque chauffante, l'échantillon et le thermomètre.

La valeur moyenne de l'intensité de la fluorescence, sur toute l'étendue de l'image, est calculée pour une température près de celle de la pièce (T_r). Cette

intensité moyenne (F_r) sert de référence. La valeur moyenne de l'intensité de la fluorescence (F_c) est ensuite calculée à partir d'images acquises pour différentes températures (T_c) variant de 24°C à 85°C environ. Ces valeurs, une fois corrigées pour le blanchiment, sont comparées à l'intensité moyenne (F_r) de la température de référence afin d'obtenir la courbe de calibration.

3.1.2 Résultats de la calibration et discussion des résultats

La figure 3.3 montre les résultats de la calibration effectuée pour une solution PMMA:EuTTA:C₆H₅Cl (1,2%:0,8%:98%).

C'est sur la gamme de températures définissant la région linéaire de la courbe de calibration (fig. 3.3) que des mesures quantitatives de température peuvent être effectuées. Les variations de température s'élevant jusqu'à $\Delta T=38^\circ\text{C}$ environ peuvent donc être mesurées. La température de référence ayant été utilisée étant de 27,1°C, des échauffements jusqu'à une température absolue de l'ordre de 65°C peuvent être mesurés. Pour la calibration présentée, une régression effectuée sur cette région linéaire de la courbe permet de déterminer l'équation de la droite représentant le plus fidèlement les données:

$$\ln\left(\frac{F_r}{F_c}\right) = 0,0399 \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

La valeur de la pente de cette droite qui détermine la sensibilité de la technique ainsi que l'étendue de l'intervalle de linéarité sont comparables aux valeurs rapportées dans la littérature. Par exemple, Barton [6] rapporte une pente de 0,032 K⁻¹.

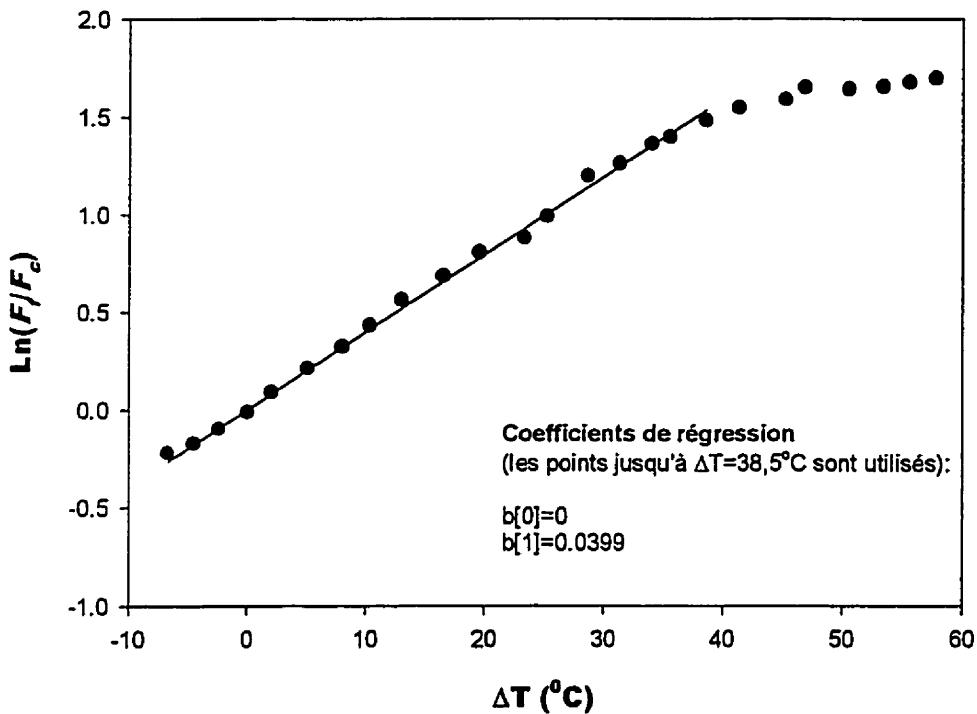


Figure 3.3. Variations du rapport de l'intensité des images de fluorescence (par rapport à l'image de référence F_r) en fonction de l'élévation de température. Cette courbe est linéaire sur une échelle semi-logarithmique pour $\Delta T < 38^{\circ}\text{C}$. La pente procure un estimé de la constante de proportionnalité (a) définie à l'équation 1.4.

3.2 Incertitude sur la mesure de température absolue (δT_A)

3.2.1 Incertitude sur $\delta \Delta T$

L'incertitude sur les mesures de variation de température peut être évaluée à partir des résultats de la calibration. Les lignes pointillées sur la figure 3.4

définissent un intervalle de confiance à 95%. La majorité des valeurs expérimentales acquises devraient donc se situer dans celui-ci. Tel qu'illustré sur la figure 3.4, l'incertitude ($\delta\Delta T$) sur la mesure de variation de température (ΔT) est déterminée par l'intersection des droites délimitant l'incertitude sur le ratio des logarithmes naturels ($\delta\ln(F_r/F_c)$) avec celles délimitant l'intervalle de confiance.

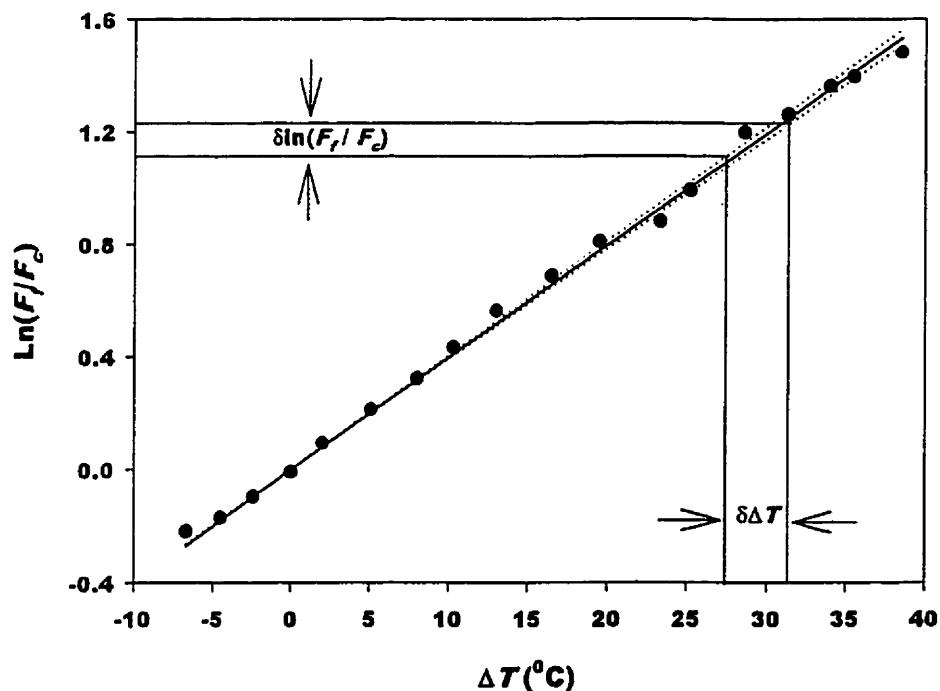


Figure 3.4. Détermination de l'incertitude sur ΔT . L'intervalle de confiance à 95% sur la droite de régression est présenté en pointillés. L'incertitude $\delta\Delta T$ est déterminé par l'intersection de l'intervalle d'incertitude $\delta\ln(F_r/F_c)$ avec les droites pointillées.

Considérant l'incertitude déterminée par l'intervalle de confiance, la pente $b[1]$ de la régression linéaire est estimée à:

$$b[1] = (0,0399 \pm 0,0016)K^{-1} \quad (3.3)$$

La figure 3.5 présente les distributions des ratios F_r / F_c obtenus, sous différentes conditions d'acquisition d'images, pour un échantillon sur lequel la température est constante. Le ratio effectué par le logiciel est multiplié par 128 afin de réduire les erreurs d'arrondi. En l'absence de toute source de bruit, les images F_r et F_c devraient être identiques, et pour un blanchiment négligeable, leur rapport (multiplié par 128) devrait être égal à 128.

La distribution a est obtenue pour un film qui n'a pas été pré-exposé. Les effets importants du blanchiment sont alors responsables du déplacement du centre de la distribution par rapport à 128. Le ratio montre un chauffage apparent. Les courbes b et c sont obtenues après une pré-exposition de 10 minutes du film. Cette fois, le blanchiment est moins important entre l'acquisition des images F_r et F_c . La distribution c est obtenue en utilisant un filtre médian 5 X 5 sur l'image utilisée en b. Ce filtrage permet de diminuer le bruit quantique, et donc, la largeur du pic. Finalement, la distribution d est obtenue en utilisant la technique de binning. Le temps d'exposition aux UV est alors réduit ce qui permet d'éliminer le chauffage apparent du dispositif dû au blanchiment. De plus, le moyennage de pixels avoisinants permet de réduire la largeur de la distribution. Les 4 distributions expérimentales se comparent à des distributions normales. Le tableau 3.1 présente la valeur centrale de chacune des distributions ainsi que leur écart-type.

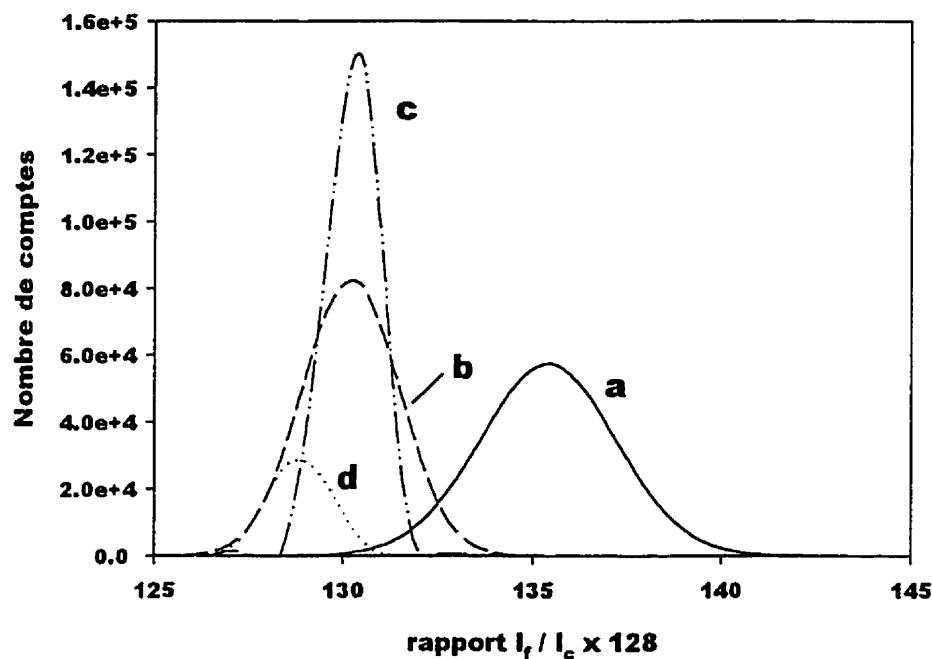


Figure 3.5. Distribution des intensités après division des images F_f / F_c . La courbe a est obtenue sans pré-exposition du film aux UV alors que les autres courbes sont obtenues après un blanchiment de 10 min. à 20X. La distribution b caractérise l'opération effectuée à pleine résolution. La courbe c présente la distribution des intensités sur l'image utilisée en b à laquelle un filtre médian 5 X 5 est appliqué. Finalement, lorsque l'image est acquise en mode "binning", on obtient la courbe d.

Tableau 3.1 Caractéristiques des distributions d'intensité obtenues pour le ratio F_r / F_c acquis à une température constante sous différentes conditions.

Distribution	Valeur centrale (c)	écart-type (σ)	$\delta \ln(F_r / F_c)$
a	135,4	1,81	0,0260
b	130,2	1,26	0,0189
c	130,2	0,659	0,0099
d	128,4	0,833	0,0129

Un intervalle de confiance de 95% sur les ratios F_r / F_c correspond à une largeur de $\pm 2\sigma$. Ce même intervalle de confiance sur le logarithme naturel du ratio ($\ln(F_r / F_c)$) est donné par:

$$\delta \ln \frac{F_r}{F_c} = \pm \frac{\partial \ln(F_r / F_c)}{\partial (F_r / F_c)} \cdot \Delta(F_r / F_c) = \pm \frac{2\sigma}{F_r / F_c} \quad (3.4)$$

qui peut être approximé, sur tout l'intervalle des valeurs de $\ln(F_r / F_c)$ par

$$\delta \ln \frac{F_c}{F_r} = \pm \frac{2\sigma}{c} \quad (3.5)$$

où c est la valeur centrale de la distribution.

Cet intervalle de confiance détermine l'incertitude $\delta \ln(F_r / F_c)$, et ce, pour chaque méthode de mesure (a à d). Dans ce qui suit, l'incertitude $\delta \ln(F_r / F_c)$ égale à 0,0099 (déterminée pour la courbe c) est utilisée.

La figure 3.6 montre comment varie $\delta \Delta T$ en fonction de ΔT lorsque l'incertitude $\delta \ln(F_r / F_c)$ est fixée à 0,0099 et que la pente de la régression est donnée par l'équation 3.3.

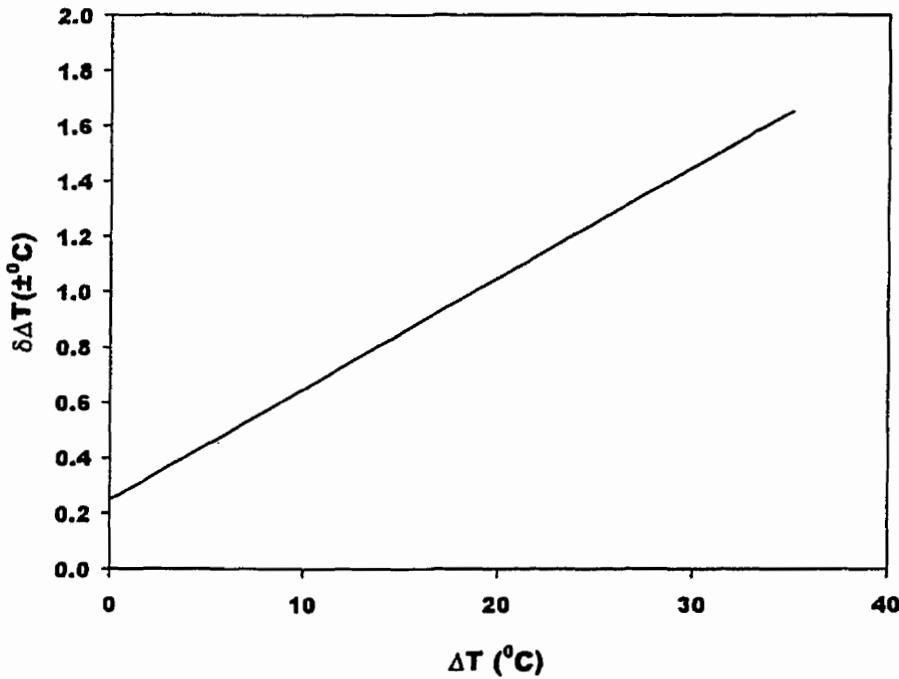


Figure 3.6. Erreur absolue ($\delta\Delta T$) sur la lecture de la variation de température (ΔT).

L'incertitude croît avec la variation de température et peut être représentée par:

$$\delta\Delta T = 0,25 + 0,04 \cdot \Delta T \quad (3.6)$$

3.2.2 Détermination de T_r et δT_r

La température de référence (T_r) peut être évaluée en plaçant un thermocouple dans l'enceinte fermée du microscope. Étant donné le chauffage de la caméra CCD et des moteurs de la plate-forme du microscope placés dans l'enceinte, cette température est généralement quelques dixièmes de degré au-dessus de

la température de la pièce. Considérant que la température ambiante peut varier dans le temps, nous considérons que la mesure de T_f est précise à $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

Le rayonnement UV induit une augmentation locale de la température. Ceci peut être vérifié qualitativement en plaçant l'extrémité du thermocouple couvert d'un film PMMA:EuTTA sous le microscope et en l'exposant aux UV. Dans cette expérience, l'élévation de température induite par les rayons UV varie de 0 à $0,4^\circ\text{C}$ et dépend de la lentille utilisée. Le tableau 3.2 présente l'élévation maximale de température observée pour différentes lentilles.

Tableau 3.2 Chauffage induit par le rayonnement UV.

Lentille	Élévation de température maximale induite par l'illumination UV ($^\circ\text{C}$)
2,5 X	0
5 X	0,2
20 X	0,4
50 X	0,2
100 X	0,2

Le chauffage de l'échantillon par les UV s'effectue dans un temps très court comparativement au temps écoulé entre l'exposition du film aux UV et la prise d'images. Il y a donc une augmentation de la température avant l'acquisition de l'image "froide" ainsi qu'avant celle de l'image "chaude". On peut donc relier ce chauffage induit par les UV à l'incertitude sur la température de référence. L'incertitude ΔT_f induite par la mesure de la température est donc déterminée par la variation de la température ambiante et par l'incertitude engendrée par le chauffage induit par les UV. Nous faisons l'hypothèse que le chauffage du film,

induit par l'illumination UV, sera du même ordre de grandeur que celui du thermocouple. Supposons qu'il puisse être de l'ordre de $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$.

L'incertitude sur T_A est donnée par la somme des incertitude $\delta\Delta T$ et δT_r . On a donc:

$$\delta T_A = \pm(1,3 + 0,04 \cdot \Delta T)^{\circ}\text{C} \quad (3.7)$$

Les hautes températures sont donc entachées d'une incertitude plus grande. Pour une variation de température de 25°C , par exemple, l'incertitude sur la mesure est de $\pm 2,3^{\circ}\text{C}$.

3.2.3 Variabilité des paramètres de calibration

Il a été vérifié qu'un vieillissement de 6 mois d'une solution particulière ne requiert pas une recalibration de cette dernière. Les propriétés de fluorescence des solutions ne changent pas significativement dans le temps.

Pour obtenir des mesures de température précises, la calibration présentée plus haut doit être refaite pour chaque nouveau mélange. En effet, de légères variations des concentrations d'une préparation à l'autre affectent la calibration. Toutefois, en général, le paramètre de calibration $b[1]$ ne change pas de façon notable d'un mélange à un autre et se situe toujours autour de 0,04. Pour 5 mélanges préparés dans des proportions PMMA:EuTTA de 3:2 dans du chlorobenzène, les valeurs obtenues pour la calibration vont de 0,037 à 0,043 environ.

Il est donc possible d'obtenir un estimé de la variation de température, à partir de mélanges non-calibrés, en utilisant $b[1]=0,04$. L'incertitude sur les lectures

de variation de température doit dans ce cas être évaluée à $(1,3 \pm 0,1 \Delta T)^{\circ}\text{C}$ environ.

3.3 Mesures absolues de température sur des transistors bipolaires effectuées par FMI.

Des mesures de température ont été effectuées sur des transistors bipolaires à hétéro-jonctions (HBT) à base d'arséniure de gallium (GaAs). L'avantage principal des dispositifs à hétéro-jonctions est leur meilleure réponse en fréquence résultant d'une plus faible résistance de la base et de l'important gain en courant qu'ils procurent [35]. L'étude des caractéristiques thermiques de ces dispositifs est importante puisque ces dernières influencent de façon significative l'interprétation des résultats de certains tests de fiabilité [36].

Afin de vérifier la calibration et de démontrer que des mesures absolues de température peuvent être effectuées à l'aide de FMI, les mesures obtenues par cette technique sont comparées à celles obtenues par la technique employant des cristaux liquides.

3.3.1 Description des dispositifs étudiés

La figure 3.7 montre la structure HBT étudiée. Sur cette image, les lignes métalliques formant le 2e niveau d'interconnexion sont bien aux foyer alors que celles formant le 1er niveau métallique sont plus floues. La région active (le HBT), qui développe la chaleur, se trouve sous le montant d'or indiqué par la flèche. On trouve tout autour du HBT quelques diodes de protection. Celles-ci sont destinées à protéger le HBT lors d'une polarisation inadéquate.

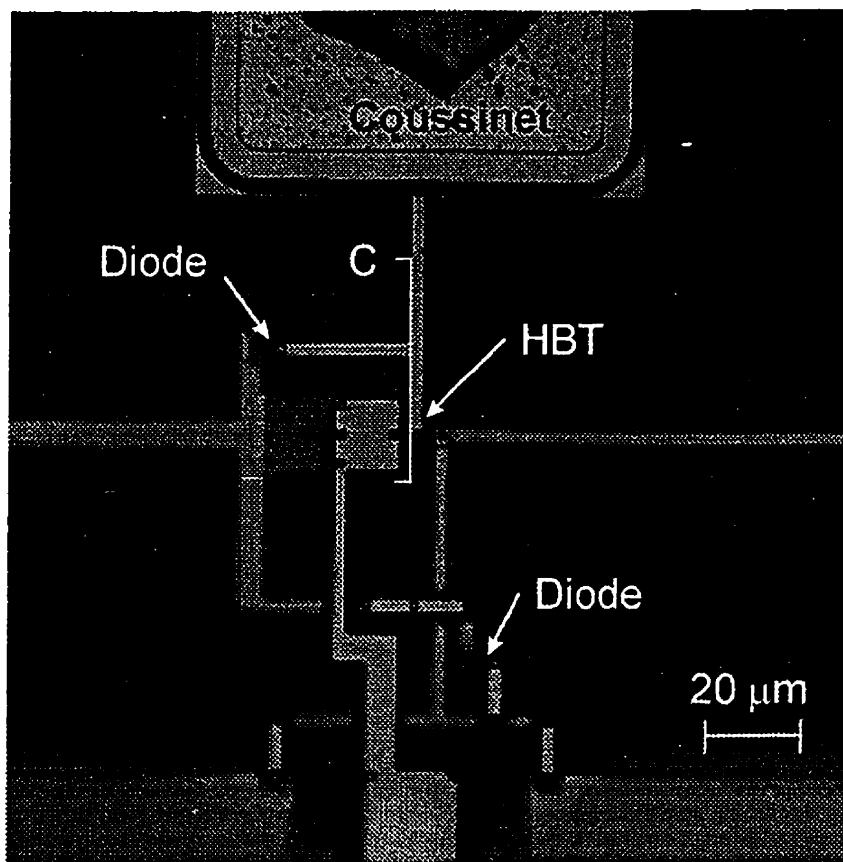


Figure 3.7. Structure HBT étudiée.

La figure 3.8 illustre la vue en coupe des transistors bipolaires étudiés. La coupe est effectuée selon l'axe C indiqué sur la figure 3.7.

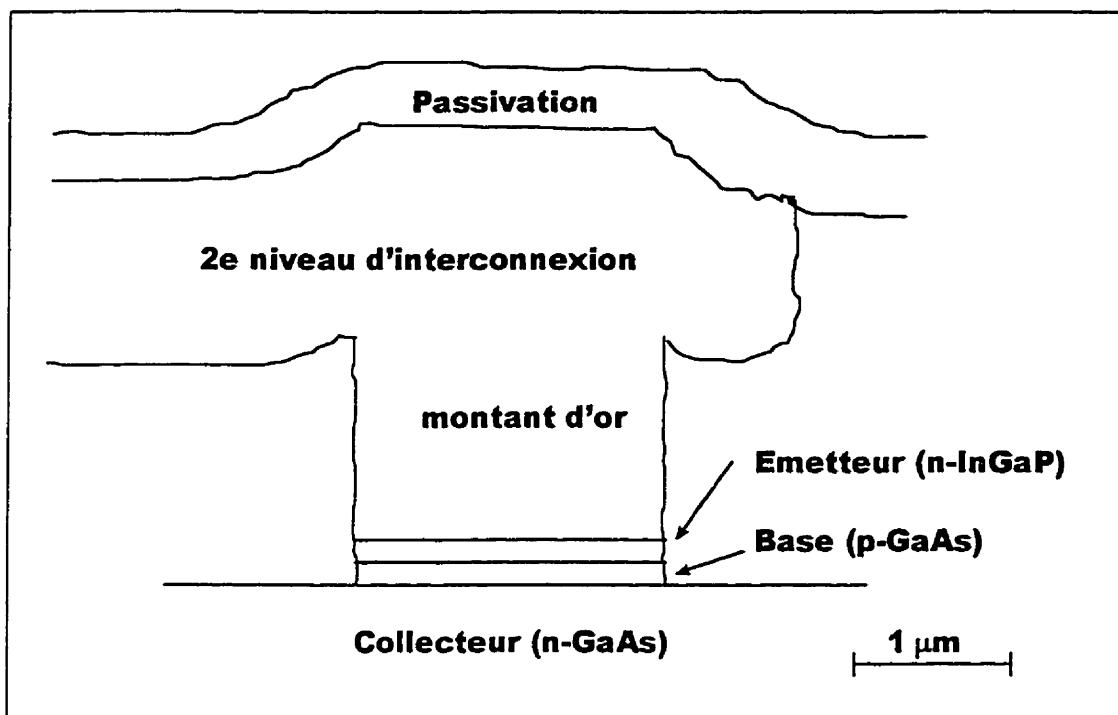


Figure 3.8 Vue en coupe du dispositif HBT étudié.

Les différentes couches actives de ces dispositifs sont créées par épitaxie par CBE (*Chemical Beam Epitaxy*) ou MOCVD (*Metalorganic chemical vapor deposition*). Donc, le collecteur, la base et l'émetteur se superposent. La région active du transistor présente une surface d'environ $2 \times 2 \mu\text{m}$ et se situe sous le montant d'or. Ce dernier a une hauteur d'environ $2 \mu\text{m}$ et relie l'émetteur au deuxième niveau d'interconnexion.

La chaleur est créée au niveau de la jonction alors que la température est mesurée à la surface du film d'EutTA déposé sur la passivation (recouvrant elle-même le second niveau d'interconnexion). La source de chaleur est donc de 3 à 5 μm au-dessous du point de mesure.

3.3.2 Artefacts spatiaux

Le profil d'élévation de température d'un HBT sous tension est représenté à la figure 3.9. Le code de couleurs représente les variations de température qui vont ici de 0 à + 36°C.

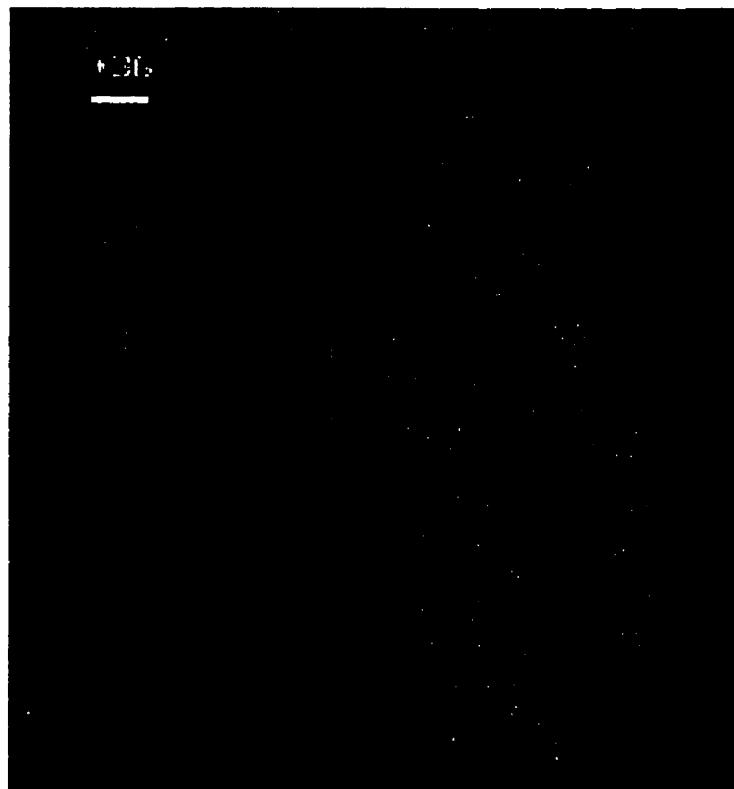


Figure 3.9. Profil d'élévation de température à la surface d'un HBT.

La figure 3.9 montre une distribution de température qui augmente en s'approchant du montant d'or. Cependant, la région directement au-dessus du montant d'or apparaît relativement froide sur cette image. La technique des cristaux liquides permet de vérifier qu'il ne s'agit là que d'un artefact et que cet endroit est au fait le plus chaud. C'est d'ailleurs ce à quoi on s'attend puisque la source de chaleur se situe directement sous le montant et que l'or conduit bien la chaleur. Cet artefact est présent même pour un film très épais ($\cong 5 \mu\text{m}$). Les

effets de blanchiment ou le recouvrement non-uniforme de la structure ne peuvent donc pas expliquer cet artefact. Il a aussi été vérifié qu'il n'est pas attribuable à une perte de foyer due au mouvement du support du microscope ou à la dilatation thermique. Seul l'effet optique présenté à la figure 3.10 peut expliquer l'artefact observé.

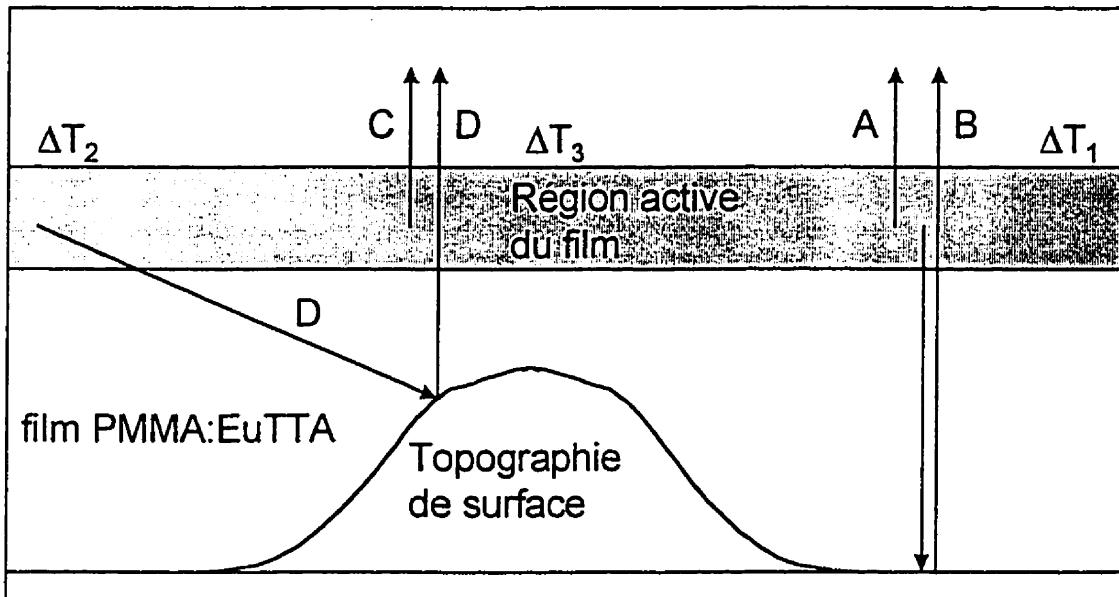


Figure 3.10. Effet optique responsable de l'artefact observé au niveau du montant sur les HBT. Au-dessus d'une région plane, l'intensité totale de la fluorescence est obtenue par la somme des contributions A et B alors qu'au-dessus de la région inclinée, les contributions C et D doivent être additionnées. En ces endroits, la variation de température lue correspond donc à une moyenne pondérée des variations ΔT_2 et ΔT_3 .

Au-dessus d'une région plane, la fluorescence captée pour les images "froide" et "chaude" est la somme de deux contributions. D'une part, on capte la fluorescence émise vers le haut dans la région active du film (A). D'autre part, une partie de l'intensité émise vers le bas est réfléchie à la surface du dispositif (B) et est aussi captée par la caméra. Dans ce cas, la lecture de la variation de température obtenue par FMI sera exacte. C'est-à-dire qu'elle sera égale à la

variation de température ΔT_1 de la région où la source d'éclairage (la fluorescence) est localisée.

Lorsque la surface est inclinée, la caméra enregistre la lumière émergeant directement du film (C) mais aussi une contribution (D) provenant des régions avoisinantes où la variation de température ΔT_2 peut être significativement différente de la variation de température que l'on veut mesurer (ΔT_3). La variation de température déduite par FMI sera une moyenne pondérée des variations ΔT_2 et ΔT_3 . L'importance de l'erreur par rapport à ΔT_3 dépend de la fraction de l'intensité attribuable à D. L'effet sera important lorsque l'inclinaison du plan est grande et pour une surface très réflective comme c'est le cas pour les HBT étudiés. Ces effets ne sont observables qu'à haut grossissement lorsque les variations de température sont importantes sur des distances de l'ordre de l'épaisseur du film.

3.3.3 Résultat des mesures de température en fonction de la puissance dissipée

La température juste au-dessus du montant ne peut pas être mesurée par FMI. On peut toutefois mesurer la température juste à côté du montant, sur la ligne métallique. C'est en ce point que la température est la plus élevée sur les profils obtenus. La figure 3.11 présente les températures absolues mesurées pour différentes valeurs de dissipation de puissance du HBT.

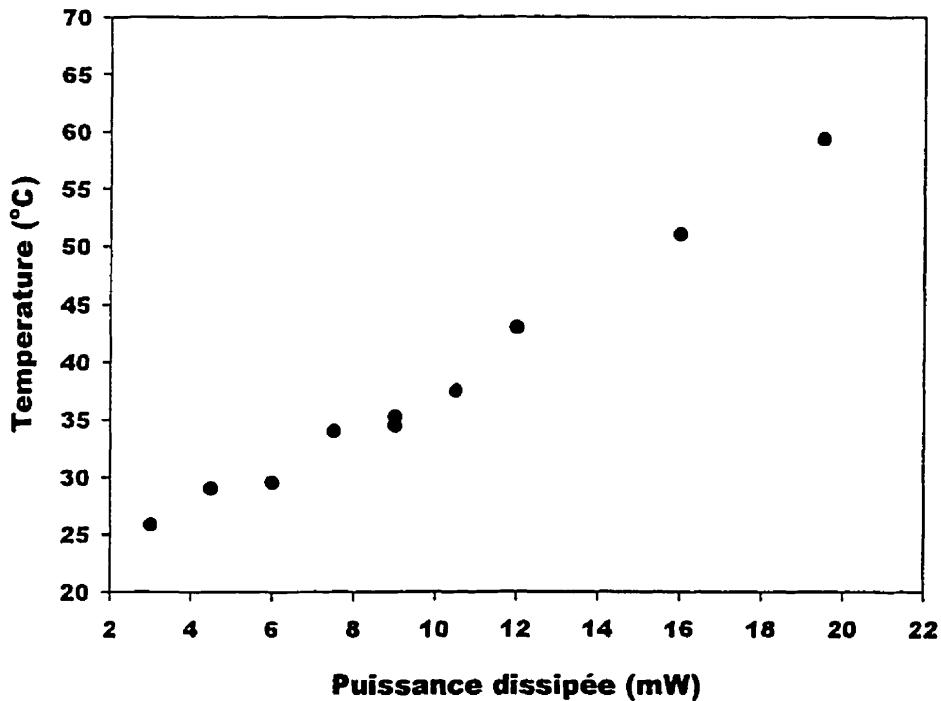


Figure 3.11. Température absolue à proximité du montant d'or en fonction de la puissance dissipée par le HBT. La température mesurée dans l'enceinte du microscope est utilisée comme température initiale ($T_f = 24,1^\circ\text{C}$).

3.4 Comparaison de la technique des cristaux liquides avec FMI

Quatre cristaux liquides sont déposés successivement afin d'étudier le chauffage des transistors bipolaires. Le distributeur fournit, pour chaque cristal liquide, la valeur de la température de transition. Il convient toutefois de vérifier celle-ci avant chaque utilisation puisqu'elle peut varier dans le temps, pour certains cristaux liquides. En particulier, le cristal liquide K34 utilisé est très instable.

Pour chaque cristal liquide, on varie le courant circulant dans le HBT afin de mesurer la puissance requise pour engendrer le changement de phase juste à la frontière du montant d'or du HBT. Le tableau 3.3 présente les cristaux liquides utilisés, leur température de transition (telle que mesurée) ainsi que la puissance devant être dissipée par le BJT afin que les cristaux liquides atteignent leur température de transition.

Tableau 3.3 Puissance requise pour engendrer le changement de phase de différents cristaux liquides

Cristal liquide	Température de transition ($^{\circ}\text{C}$)	Puissance dissipée ³ (mW)
E7	$28 \pm 0,5$	4,5
K21	$40,5 \pm 0,5$	10,9
K18	$58 \pm 0,5$	18,2
N4	$72,5 \pm 0,5$	25,7

Sur la figure 3.12, les résultats précédents obtenus pour les quatre cristaux liquides sont superposés aux mesures de température acquises par FMI. Les barres représentent l'incertitude sur les mesures de température acquises par FMI telle qu'elle a été déterminée à la section 3.2.2 (c.f. équation 3.7). Pour les deux techniques, les mesures de température présentées ont été effectuées en périphérie du montant du HBT.

³ Pour chaque cristal liquide, les valeurs présentées ont été obtenues à partir de la moyenne de 10 lectures de la puissance dissipée.

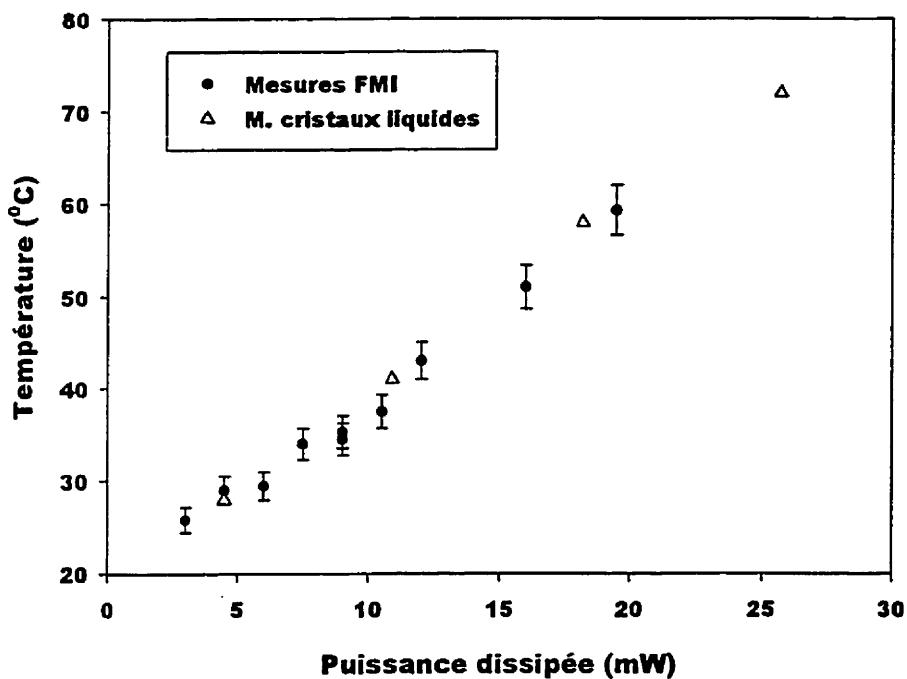


Figure 3.12. Comparaison des mesures absolues de température obtenues par FMI et par la technique des cristaux liquides.

3.5 Conclusions sur la validité des résultats de mesures absolues de température par FMI

Le graphique de la figure 3.12 montre que les résultats obtenus par la technique des cristaux liquides concordent avec les mesures effectuées par l'imagerie thermique par fluorescence. L'hypothèse selon laquelle le chauffage du film induit par le rayonnement UV est inférieur à 1°C semble vérifiée puisque l'ensemble des points acquis par la technique des cristaux liquides se situent dans les limites d'incertitude fixées par les barres d'erreur.

Le gradient de température le long de la connexion de l'émetteur (ligne à laquelle se superpose l'axe C sur la figure 3.7) peut être évalué à partir des images thermiques. La figure 3.13 montre comment varie la température le long de cette ligne métallique. La puissance dissipée est ici de 19 mW.

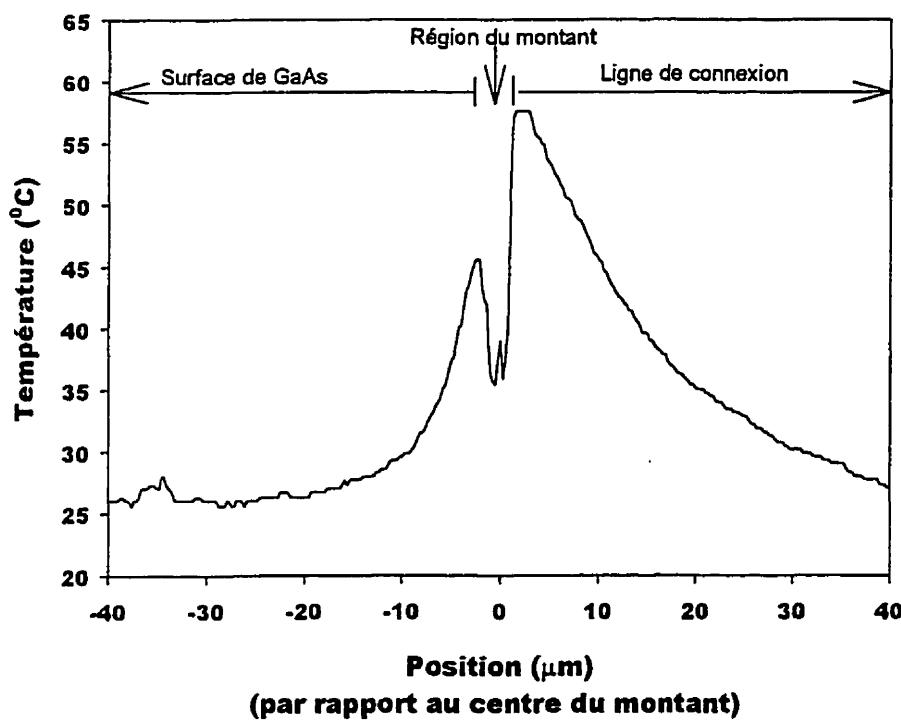


Figure 3.13. Gradient de température sur la connexion de l'émetteur tel que mesuré par FMI. L'origine de l'axe des x correspond au centre du montant.

L'artefact dû au montant est évident sur cette figure. Le gradient de température entre 3 μm et 10 μm est approximativement constant et vaut $1,7^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$ environ. Ceci suggère que la température, directement à la jonction émetteur-base située

environ 2 μm sous le deuxième niveau de métallisation, puisse être de quelques degrés au-dessus de la température mesurée en surface.

Finalement, notons que les mesures de température effectuées par FMI, et représentées à la figure 3.12, montrent une certaine non-linéarité. La pente de la courbe croît légèrement avec l'élévation de la température. Ceci est en accord avec diminution de la conductivité thermique du GaAs en fonction de la température prédictive par la théorie. En général, la conductivité thermique (K_T) varie comme [37]:

$$K_T = K_{T_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^s$$

où T est la température à laquelle K_T est évaluée, T_0 est la température de référence et s est un exposant déterminé empiriquement pour chaque matériau. Cette expression est valide pour des températures variant de 150 K à 600 K environ. Pour l'arsénure de gallium, s vaut environ -1,25. Les variations de K_T , qui vaut environ 0,8 W/C-cm à 300 K, sont donc relativement importantes. Par exemple, à $T = 320$ K, $K_{320} \approx 0,74$ W/C-cm ce qui représente une variation d'environ 10% de la conductivité.

Dans ce chapitre, l'étude des HBT permet de vérifier que FMI peut procurer des lectures absolues de température fiables pour des températures allant jusqu'à 65°C environ. L'incertitude sur les mesures varie selon l'élévation de température (selon l'équation 3.7) mais elle est au plus de quelques degrés.

On montre aussi que FMI permet d'obtenir la température à la surface de structures de quelques micromètres de large. L'exemple des HBT montre toutefois que les lectures de température ne seront exactes que sur les surfaces planes. Des artefacts peuvent apparaître sur les surfaces inclinées même si

l'épaisseur du film et les effets du blanchiment sont bien contrôlés. Ces artefacts seront importants à fort grossissement (50X et 100X) lorsque la surface est réfléchissante et dans le cas où les variations de température sont importantes sur des distances de quelques micromètres.

CHAPITRE 4 Mesures de température sur les flip chips

Les chapitres précédents présentent les améliorations apportées à la technique de FMI ainsi que les différentes expériences qui ont permis de la comprendre et de la maîtriser. Le présent chapitre évalue la capacité de l'imagerie thermique par fluorescence à identifier les sites de défaillance à partir de l'endos de dispositifs de microélectronique. L'intérêt pour l'analyse de défaillance à partir de l'endos, pour les technologies de montage en surface et en particulier pour les flip chips, a été expliqué en introduction.

Les flip chips produits par Nortel sont faits à partir de pastilles de 15 cm (6 pouces) de diamètre. L'épaisseur de ces pastilles est de 650 µm environ. Les premiers profils de température obtenus par l'imagerie thermique par fluorescence à partir de l'endos de différents dispositifs flip chips ne permettaient pas de localiser les sites de chauffage. Dès lors, il est apparu essentiel d'amincir les puces, à partir de l'endos, avant l'analyse thermique. Des échantillons d'épaisseurs différentes sont utilisés pour l'évaluation de la technique de FMI. Les puces peuvent être amincies jusqu'à 5 µm environ. Le détail de la procédure de polissage est donné dans ce chapitre.

Afin d'évaluer la résolution spatiale de l'imagerie à partir de l'endos, un échantillon comportant plusieurs structures chauffantes séparées par des distances variables est requis. Aucun produit flip chip monté chez Nortel ne convient à ce type d'analyse. Il a donc été nécessaire de modifier un dispositif existant afin d'obtenir une structure-test adéquate. Les étapes menant à l'élaboration de cette structure sont détaillées ci-dessous.

Finalement, la résolution spatiale atteinte par FMI pour différentes épaisseurs de la puce est présentée. À partir de ces résultats sur un échantillon test, il est possible de déterminer une procédure qui optimise l'étude des défaillances sur des dispositifs de type flip chip.

4.1 Polissage des échantillons

L'analyse de défaillance à partir de l'endos des flip chips requiert le polissage d'une fraction importante de l'épaisseur du substrat, c'est-à-dire de la puce elle-même. Le calcul théorique présenté à l'annexe A1 prédit que la diffusion de la chaleur engendre un élargissement linéaire du profil thermique en fonction de l'épaisseur. Après polissage, la distribution thermique observée à la surface de l'endos représente donc plus fidèlement, et avec une meilleure résolution spatiale, la distribution de température au niveau de la circuiterie même.

4.1.1 Équipement utilisé pour le polissage

Le polissage est effectué de façon mécanique en utilisant des papiers polisseurs à grains de différentes tailles. Les polisseurs mécaniques sont répandus dans les laboratoires d'analyse de défaillance puisqu'ils sont utilisés pour la préparation des échantillons dont on veut obtenir des vues en coupe. Ils servent aussi à l'enlèvement un à un des niveaux métalliques d'un échantillon (appelé *deprocessing* dans le jargon du métier) nécessaire dans certaines analyses. Ces polisseurs, dont un exemple est illustré à la figure 4.1, peuvent être utilisés pour l'amincissement des flip chips.

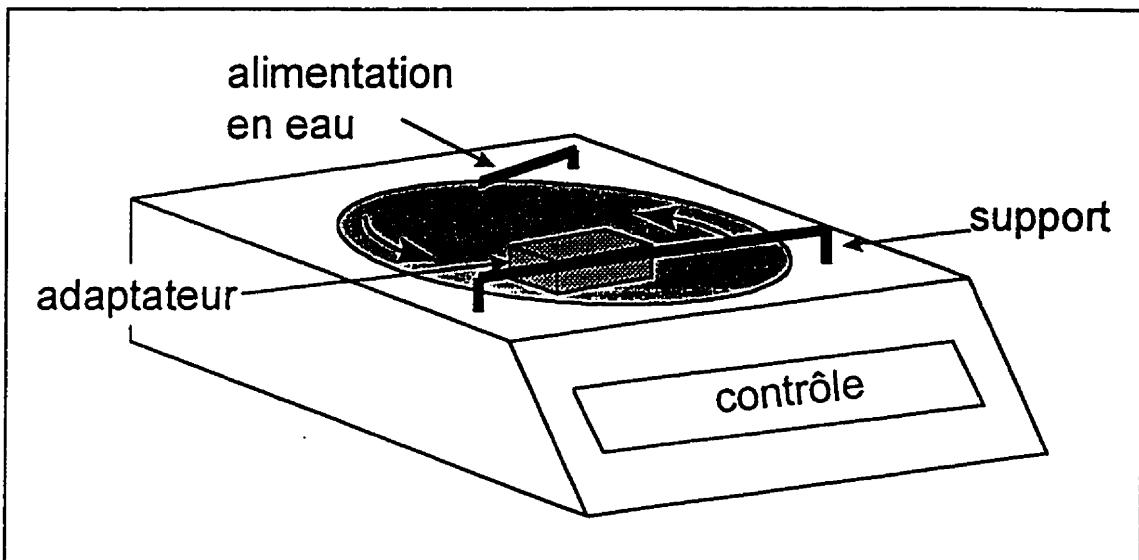


Figure 4.1. Polisseur mécanique utilisé pour l'amincissement, à partir de l'endos, des flip chips.

Un polisseur est constitué d'un disque rotatif dont la vitesse est contrôlable. Des papiers polisseurs ayant des grains de différentes tailles peuvent être installés sur ce disque. De plus, une alimentation en eau permet de mouiller la surface du papier et d'évacuer les particules résultant du polissage. Un support simple permet de maintenir l'adaptateur sur lequel est monté l'échantillon. Sur l'adaptateur, deux vis permettent de maintenir l'échantillon à plat. Le parallélisme de l'échantillon est évaluée à l'oeil nu. Des poids peuvent être ajoutés sur l'adaptateur afin d'accélérer le polissage.

Afin d'optimiser le temps et la qualité du polissage, différents papiers polisseurs doivent être utilisés successivement pour différentes épaisseurs de la puce. L'utilisation successive de papiers à grains de plus en plus fins comporte deux avantages. Elle permet d'éviter que des contraintes trop importantes, engendrées par le polissage, endommagent le dispositif et elle assure un meilleur contrôle de l'épaisseur et du parallélisme tout au long du polissage. Le

tableau 4.1 montre quel papier devrait être utilisé en fonction de l'épaisseur de l'échantillon. Ce tableau ne doit être utilisé qu'à titre indicatif et le choix du papier à chaque épaisseur peut varier d'un dispositif à l'autre.

Tableau 4.1 Papiers polisseurs à utiliser pour différentes épaisseurs du substrat.

Grain du papier (μm)	Domaine d'épaisseurs (μm)
70	> 150
30	150 - 80
15	80 - 50
6	50-30
3	30-15
1	< 15

Avant chaque mesure d'épaisseur, effectuée par l'une des deux techniques décrites dans la section qui suit, il est nécessaire d'obtenir un polissage fin de l'endos de l'échantillon. Ceci permet de minimiser la diffusion de la lumière infrarouge à la surface. Avant chaque mesure, il convient donc d'utiliser successivement des papiers de grains de plus en plus fins jusqu'à obtenir une surface exempte d'égratignure importante.

4.1.2 Contrôle de l'épaisseur et du parallélisme

La microscopie infrarouge (i) et la mesure de franges d'interférence (ii) sont utilisées afin de contrôler le polissage et d'en suivre l'évolution jusqu'à des épaisseurs de l'ordre de quelques micromètres.

- i) Tel que mentionné à la section 1.2, le microscope Zeiss LSM peut être utilisé en mode infrarouge. La transparence du Si dans cette région du spectre permet d'utiliser le laser infrarouge pour évaluer l'épaisseur de la puce. La mise au foyer de l'image est d'abord effectuée sur l'endos du dispositif. Ensuite, on déplace le plan focal au niveau de la circuiterie. La différence de hauteur entre les deux points focaux et la connaissance de l'indice de réfraction du Si à la longueur d'onde utilisée [38] ($n_{\lambda=1150\text{nm}} = 3.53$) permettent d'évaluer l'épaisseur de l'échantillon. En utilisant une lentille de 50X et en travaillant en mode confocal, il est possible d'obtenir une précision de l'ordre de 10 μm environ. Pour des épaisseurs de Si inférieures à 50 μm , cette technique ne peut être utilisée puisque la présence de nombreuses franges d'interférence empêche de discerner clairement les deux plans de focalisation.
- ii) À partir des franges d'interférence observées sur un spectre IR obtenu en réflexion (sur la plage de longueurs d'onde allant de 2,5 à 10 μm environ), il est possible d'évaluer l'épaisseur de l'échantillon. À cette fin, on utilise un appareil de spectroscopie par transformée de Fourier (FTIR) commercial (*Nicolet Instrument*). Ici aussi, il convient de polir l'endos de la puce avant l'acquisition des spectres. Il est aussi nécessaire que le faisceau soit réfléchi par une surface métallique (à la seconde interface) afin d'obtenir un signal de réflexion suffisant. Pour la structure-test utilisée, il suffit de centrer le faisceau sur une région de la circuiterie comportant des conducteurs métalliques. La région circulaire a un diamètre d'environ 100 μm . La lecture d'épaisseur obtenue est une moyenne de l'épaisseur sur la région éclairée par le faisceau IR. À partir des longueurs d'onde correspondant à deux maxima (λ_0 et λ_i), à incidence normale, l'épaisseur (e) est donnée par [39]:

$$e = \frac{i\lambda_0\lambda_i}{2n(\lambda_i - \lambda_0)} \quad (4.1)$$

où i représente le nombre de cycles entre les fréquences λ_0 et λ_i .

En mesurant l'épaisseur d'un échantillon aux quatre coins, en utilisant une ou l'autre de ces techniques, il est possible de bien contrôler le parallélisme du polissage. Toutefois, cette façon de procéder est fastidieuse. Des inspections visuelles fréquentes de l'échantillon monté sur l'adaptateur, permettent de maintenir un polissage égal de toutes les régions de la puce à quelques micromètres près.

Cette méthodologie de polissage est utilisée à la section 4.3 afin d'évaluer la résolution spatiale de FMI sur la structure-test présentée ci-dessous.

4.2 Préparation de la structure-test

La préparation de la structure-test a nécessité la modification de la circuiterie d'un dispositif existant (code d'identification: ZA19) au niveau de la puce. Ensuite, la procédure habituelle de mise en boîtier a été suivie afin d'obtenir un dispositif flip chip. Cette procédure comprend l'alignement du dispositif avec le PCB, la soudure par refusion et la déposition de l'encapsulant. Notre dispositif-test a donc une structure et des propriétés mécaniques comparables à celles des flip chips commerciaux. La réussite des opérations de polissage sur l'échantillon-test sera donc garante de leur applicabilité à des échantillons de commerciaux.

4.2.1 Description du ZA19 et de la structure-test utilisée

Le ZA19 a été développé par Nortel pour étudier la fiabilité des soudures, les dommages causés par l'encapsulant ainsi que les effets de corrosion sur des flip

chips. Ce dispositif ne comporte qu'un niveau métallique d'aluminium. Un demi-micromètre de nitrure de Si (Si_3N_4) et 1 micromètre de SiO_2 servent de passivation.

Une photographie du circuit du ZA19 est montrée à la figure 4.2. On y discerne 3 rectangles, chacun formé par 3 lignes métalliques qui se suivent en méandre. Les billes de soudure sont disposées en deux rangées tout autour de la puce dont les dimensions sont de 6,5 mm x 6,5 mm environ.

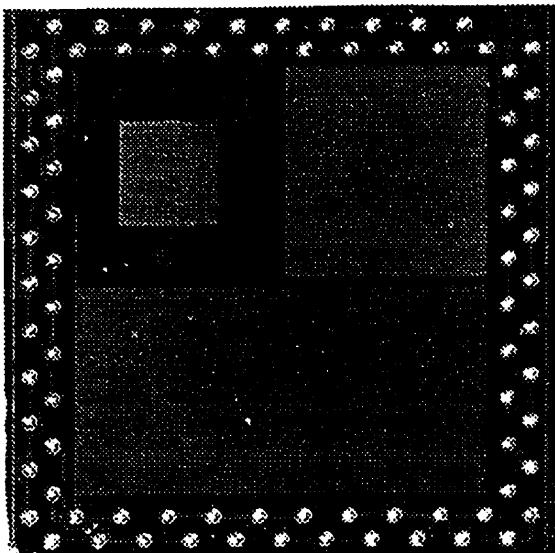


Figure 4.2. Circuiterie du ZA19.

Les premiers profils de température, à partir de l'endos, ont été obtenus en mettant sous tension le plus petit rectangle du dispositif (en haut à gauche sur la figure 4.2). La figure 4.3 montre un exemple d'un tel profil. Cette figure est inversée (par rapport à un axe vertical) par rapport à la photographie de la figure 4.2. C'est ainsi qu'apparaît la circuiterie après le renversement de la puce sur le PCB.

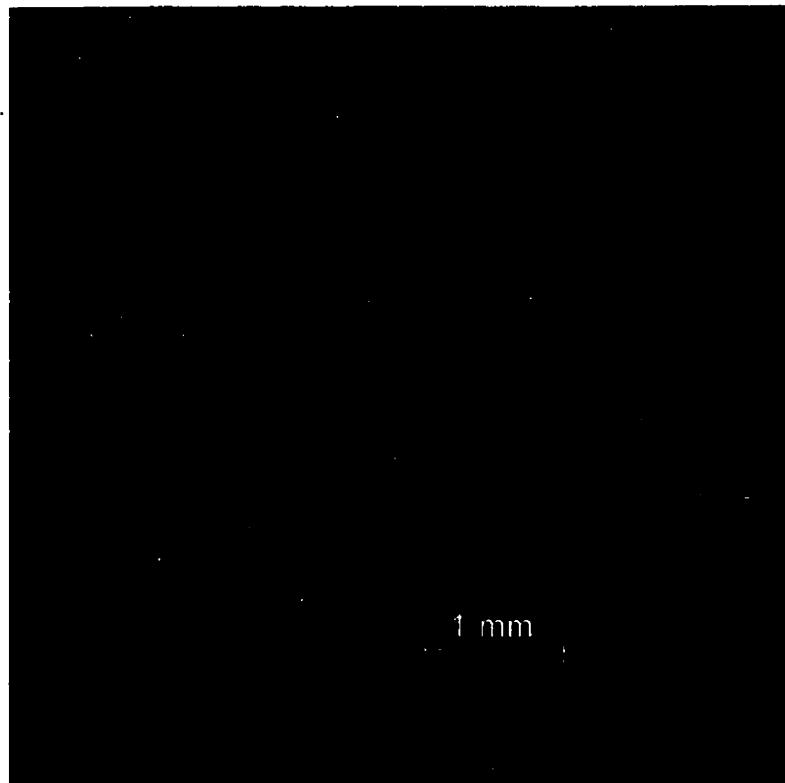


Figure 4.3. Profil de température sur un dispositif ZA19. Une puissance de 670 mW est dissipée dans le carré de 1,1 mm de côté. L'épaisseur de la puce est de 170 μm . Le profil thermique apparaissant en rouge est superposé à l'image infrarouge de la circuiterie ici représentée en bleu.

Le chauffage de la structure est important et distribué sur l'ensemble de la structure. Il est impossible d'y discerner les lignes métalliques individuelles, et ce, même après polissage. On ne peut pas évaluer la résolution spatiale de la technique à partir de cette structure. La modification de la structure est donc nécessaire.

En utilisant un *focused ion beam* (FIB), il est possible de déposer des lignes de tungstène afin d'isoler une région particulière de la circuiterie du ZA19. On peut

alors étudier la résolution spatiale à partir de lignes conductrices séparées de différentes distances.

La figure 4.4 illustre la région d'intérêt. La partie active du circuit qui sera utilisé est représentée en rouge et les flèches indiquent la circulation du courant. La ligne rouge horizontale est au fait constituée de deux lignes d'aluminium parallèles, séparées par une distance de $2 \mu\text{m}$, dans lesquelles le courant circule dans des directions opposées. Les deux lignes sont trop rapprochées pour être distinguées individuellement sur la figure 4.4. Ces mêmes lignes métalliques passent par le point C et se suivent tout au long du méandre formant le grand carré résistif représenté en jaune. Les deux lignes sont court-circuitées aux 3 points identifiés A, B et C par la déposition de tungstène.

4.2.2 Déposition de tungstène

Le FIB Micrion 9000 utilise un faisceau d'ions de gallium à haute énergie (30keV) afin de faire l'ablation (par pulvérisation) de certaines structures ou de déposer certains matériaux. La déposition à l'aide du FIB est possible lorsque l'interaction du faisceau de gallium avec un gaz (présent localement sous une pression de quelques millitorrs) permet l'adsorption de certains éléments en un point de la surface [40]. L'emploi d'une source de $\text{W}(\text{CO})_6$ permet de déposer du tungstène avec une précision de l'ordre de un 0,1 micromètre. La figure 4.5 présente une image SEM des court-circuits A et B créés à l'aide du FIB. Précisons que cette opération comporte 3 étapes distinctes: le forage des vias au travers la passivation, leur remplissage et finalement la création du court-circuit entre les deux lignes métalliques.

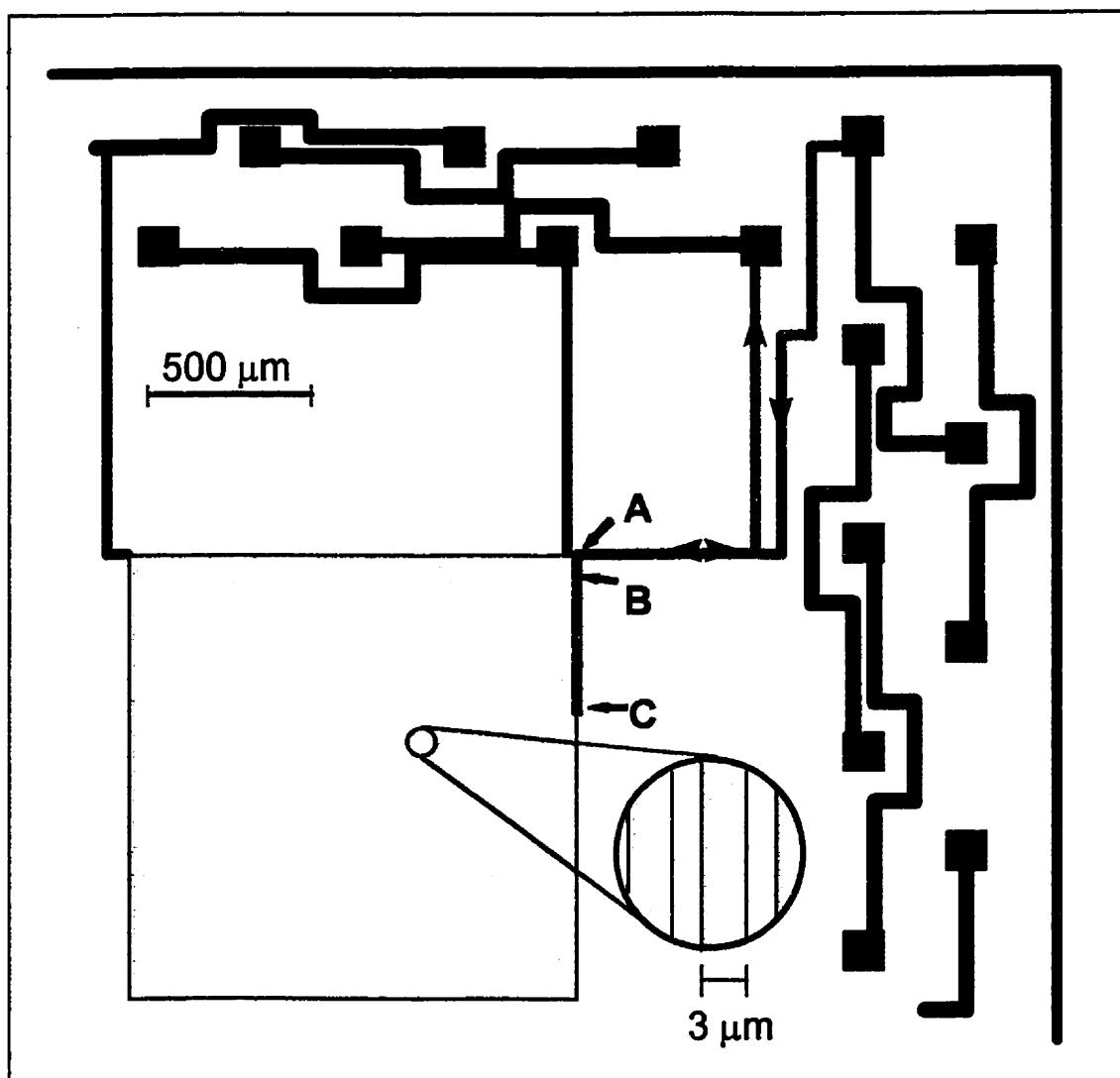


Figure 4.4. Circuit actif après la déposition du tungstène court-circuitant deux lignes métallique du dispositif original (représentées en rouge) aux positions A, B et C. Les flèches illustrent la circulation du courant entre les deux coussinets représentés en rouge.

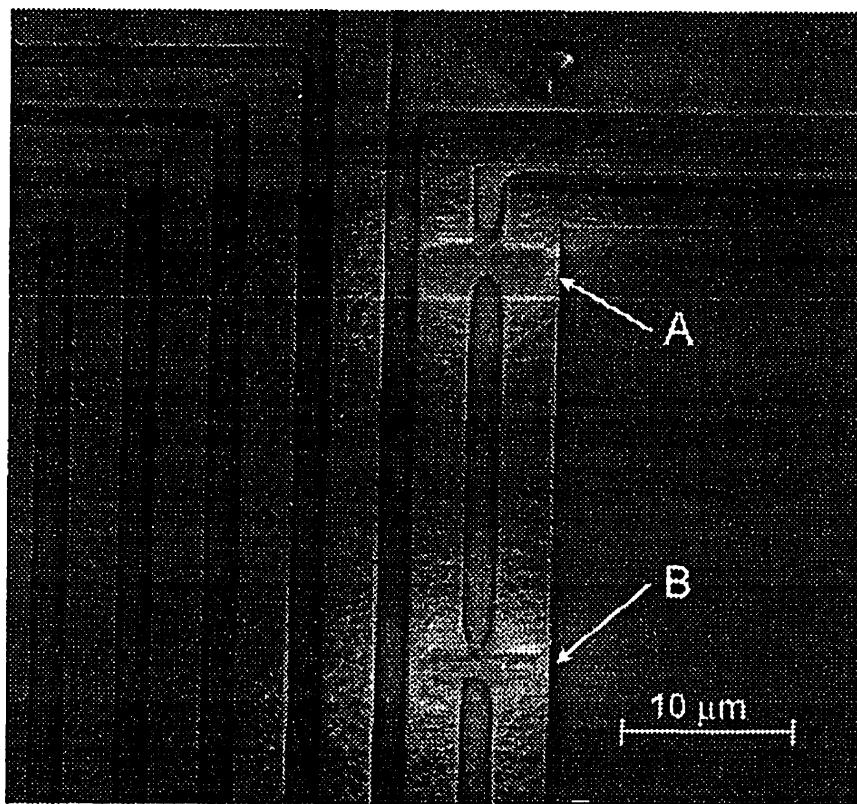


Figure 4.5. Image SEM des court-circuits A et B créés par la déposition de tungstène à l'aide du FIB.

4.2.3 Mise sous boîtier

La mise sous boîtier des dispositifs flip chips requiert 3 étapes importantes: l'alignement de la puce avec le substrat (PCB) (i), la soudure par refusion (ii) et la déposition de l'encapsulant (iii).

- i) L'aligneur manuel Kodak permet d'aligner les billes de soudure, fixées aux coussinets de la puce, avec les coussinets de connexion situés sur le PCB. Dans un premier temps, les billes de soudure sont trempées environ à mi-hauteur ($\approx 50 \mu\text{m}$) dans du flux. Le flux permet de retenir la puce au PCB avant la soudure par refusion, il nettoie les surfaces et aide à la distribution

uniforme de la soudure en fusion. Ensuite, la puce et le PCB sont alignés manuellement à l'aide d'un système de positionnement micrométrique. L'observation simultanée des coussinets du PCB et des billes de soudure de la puce renversée face au PCB est rendue possible par un système optique simple. Une fois l'alignement complété, les deux pièces sont mises en contact.

- ii) La soudure par refusion (*reflow*) consiste en un cycle thermique qui permet d'obtenir des soudures ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et assurant de bonnes connexions électriques. L'échantillon est donc placé dans un four où il est soumis à des températures variant de 150°C à 400°C.
- iii) L'encapsulant (*underfill*) est déposé automatiquement autour de la puce par un appareil de positionnement programmable. L'appareil contrôle la vitesse de déplacement et le débit de la seringue contenant la résine d'époxy. Après la déposition de la résine autour de la puce, le dispositif est placé dans un four. Là, par capillarité, la résine d'époxy s'infiltra entre les billes de soudure, remplit complètement l'espace entre la puce et le PCB et elle se durcit. L'encapsulant est utilisé pour tous les flip chips puisqu'il assure la solidité du dispositif sur le PCB.

4.3 Étude de la résolution spatiale des profils thermiques

La figure 4.6 présente 3 profils de température obtenus à partir de l'endos de flip chips polis à des épaisseurs de 150 µm, 40 µm et 5 µm. Dans les trois cas, une puissance de 130 mW est dissipée dans le circuit résistif. On observe qualitativement l'augmentation de la résolution spatiale. On peut reconnaître sur ces images, et en particulier sur la dernière, le patron résistif illustré à la figure 4.4. Seule la section entre le pont B et le pont C est absente du profil de température.

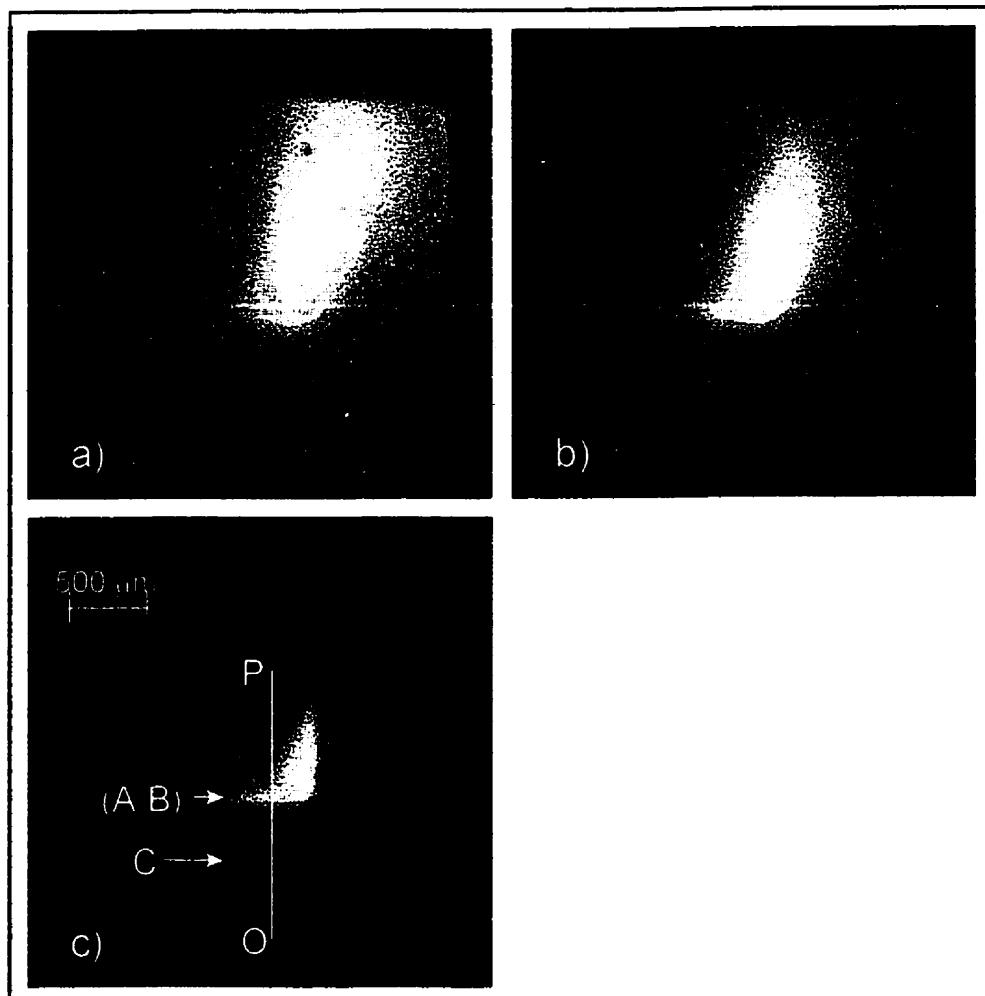


Figure 4.6. Profils de température obtenus de l'endos de flip chips pour des épaisseurs de la puce de 150 μm (a), 40 μm (b) et 5 μm (c). Les positions des courts-circuits A, B et C sont indiquées sur la figure c).

La figure 4.7 présente, pour sa part, l'élévation de la température en fonction de la position le long du segment de droite OP montré à la figure 4.6 c). Le profil thermique est plus abrupte sur la partie gauche de la courbe (qui correspond à la région inférieure de l'image 4.6 c)) puisque cette région est éloignée des autres éléments chauffants de la structure. La partie gauche du profil thermique se compare bien à une courbe lorentzienne.

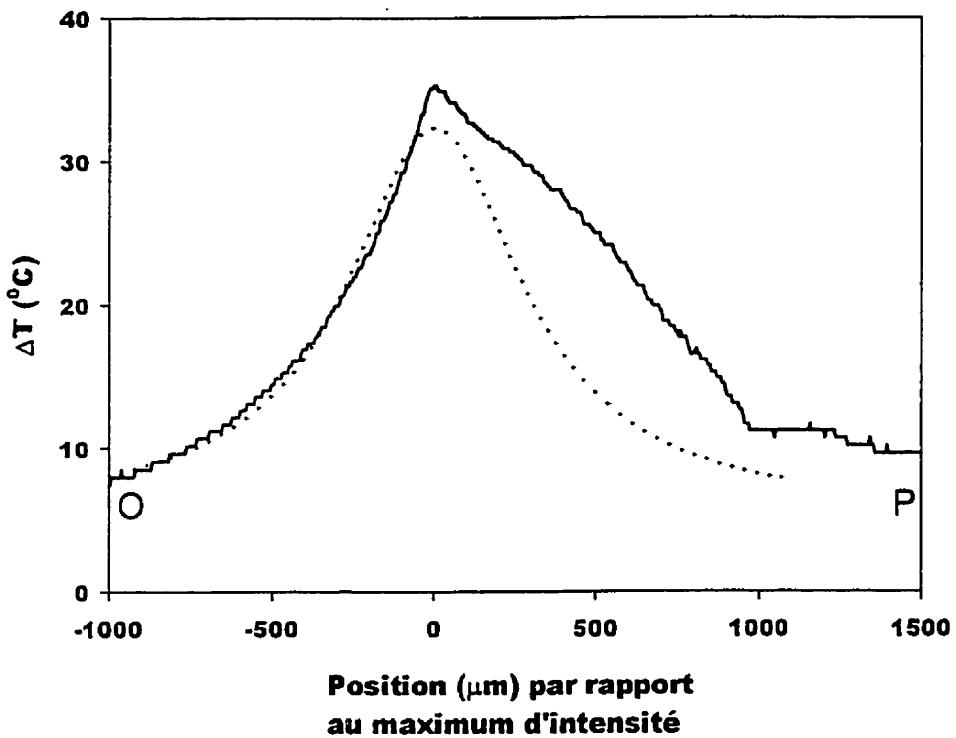


Figure 4.7. Profil de l'élévation de température selon la ligne OP représentée sur la figure 4.6c). La ligne pleine montre le profil expérimental alors que la ligne pointillée présente la courbe lorentzienne reproduisant le mieux les résultats sur la partie de gauche.

Les profils de température ont été acquis par FMI pour différentes épaisseurs de la puce et pour différentes dissipations de puissance. Les profils correspondant à celui montré à la figure 4.7 ont été extrait pour chacun. La figure 4.8 présente, pour chaque profil obtenu, la largeur à mi-hauteur (FWHM) de la courbe lorentzienne s'approchant le mieux des résultats expérimentaux.

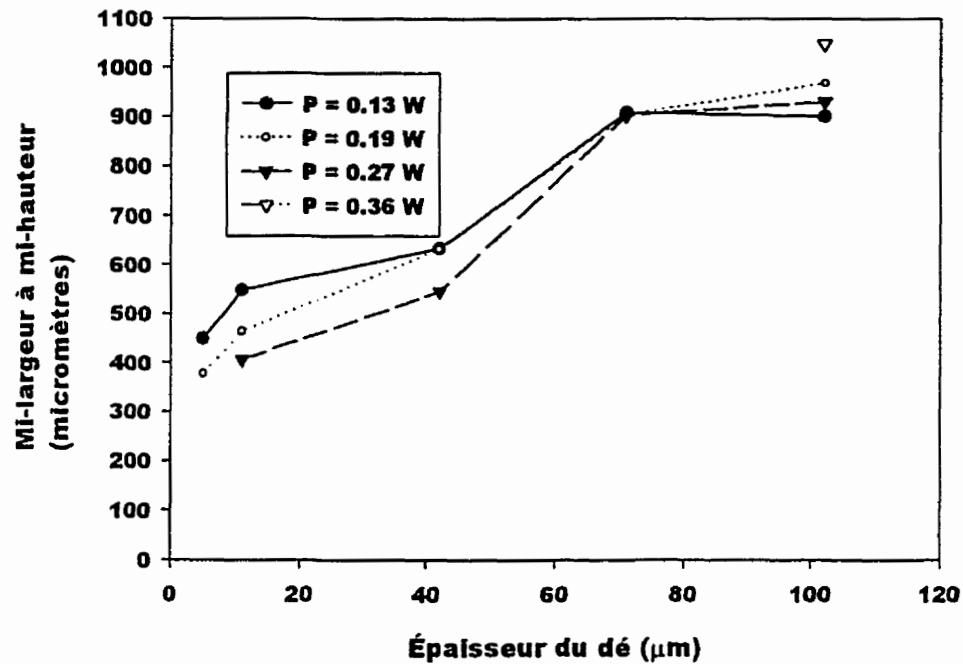


Figure 4.8. Largeur à mi-hauteur (le long du segment OP) des profils obtenus pour différentes épaisseurs et différentes dissipations de puissance.

Il est clair que la résolution augmente lorsqu'on amincit la puce. Elle est aussi améliorée, mais de façon moins significative, par l'augmentation de la dissipation de puissance.

4.4 Discussion des résultats

Pour de hautes puissances, la température peut être supérieure à 60°C. Pour de telles températures, la dépendance en température de la fluorescence du film chute de façon importante. À faible épaisseur, la résolution spatiale de la technique est donc maximisée lorsque la température est sous ce seuil de 60°C.

L'utilisation de puissances plus élevées est inutile. De plus, l'utilisation de courants trop élevés peut endommager la circuiterie. Dans l'expérience précédente, on n'utilise donc que de faibles puissances (130 mW et 190 mW) lorsque l'épaisseur de la puce est de 5 µm.

Les résultats présentés à la figure 4.8 mettent à jour la relation linéaire entre l'épaisseur et la largeur des profils de température prédictes par le calcul théorique présenté à l'annexe A1. L'extrapolation linéaire des courbes de la figure 4.8 à une épaisseur nulle, donne une largeur à mi-hauteur entre 350 µm et 400 µm. Pour un dispositif flip chip, dans la limite d'une puce d'épaisseur nulle, la chaleur ne peut se dissiper que par l'encapsulant vers les billes de soudure et le PCB. L'extrapolation à une largeur à mi-hauteur non-nulle est indicatif de la capacité de l'encapsulant à dissiper la chaleur.

Bien qu'adéquates pour comparer les profils de température obtenus pour les différentes conditions étudiées, les valeurs de pleine largeur à mi-hauteur mesurées ne sont pas représentatives de la résolution spatiale atteinte par FMI à partir de l'endos de flip chips. Par exemple, pour une puce dont l'épaisseur est de 150 µm, on peut discerner sur les profils de température, 2 lignes conductrices séparées de 250 µm environ. De la même façon, pour une puce de 5 µm d'épaisseur et en utilisant une lentille de 20X, il est possible de discerner deux lignes séparées de 40 µm. Sur les images acquises à 20X, et à cause de leur faible étendue, les ponts A et B (montrés aux figures 4.4 et 4.5) ne sont pas clairement distinguables bien qu'ils soient eux aussi séparés de 40 µm.

De plus, pour une épaisseur de la puce de 5 µm, la position du centre de la distribution de température présentée à la figure 4.7, peut être évaluée avec une précision de ± 5 µm environ. Cette mesure est représentative de l'incertitude

que l'on a sur la position d'un point chaud lors de l'utilisation de FMI pour une analyse de défaillance à partir de l'endos d'un flip chip.

La résistance d'une ligne d'aluminium formant le méandre (longueur d'environ 64 mm) est de l'ordre de 600Ω . Cette mesure permet d'évaluer la résistance par unité de longueur à $0,01 \text{ ohm}/\mu\text{m}$ environ. Typiquement, les lignes de tungstène déposées à l'aide du FIB ont une résistance de l'ordre de $1 \text{ ohm}/\mu\text{m}$. On considère que les ponts, incluant les montants, ont une longueur d'environ $10 \mu\text{m}$ et donc une résistance de 10 ohms . La figure 4.9 présente le schéma électrique équivalent au circuit illustré à la figure 4.3 obtenu à partir de ces valeurs de résistance par unité de longueur. La résistance de chaque segment de ligne d'aluminium est obtenue en multipliant sa longueur par $0,01 \text{ ohm}/\mu\text{m}$.

La résistance équivalente théorique de ce circuit est de 35Ω alors que la résistance équivalente mesurée du circuit est de 25Ω environ. Ceci suggère que nous avons légèrement surestimé la résistivité des lignes d'aluminium. L'importance de la résistance (4Ω) des segments entre les ponts B et C contribue à diminuer le courant passant dans ce dernier. Le pont C dissipe environ 4 fois moins de puissance que les ponts A et B. Cela explique qu'il soit inobservable sur les profils obtenus.

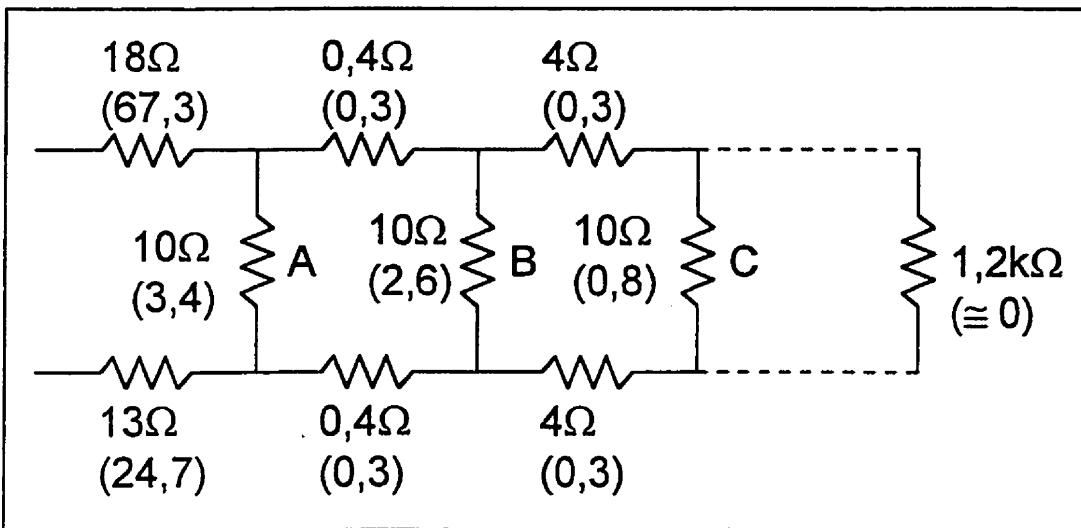


Figure 4.9. Schéma électrique du circuit test. Les ponts ont une résistance de 10 ohms et la résistance de chaque segment d'aluminium est calculé à partir de leur longueur. La partie du méandre passée le pont C a une résistance de l'ordre de $1,2\text{k}\Omega$ et elle sera négligée dans les calculs qui suivent. Les nombres entre parenthèses représentent la fraction de la puissance (en pourcentage) dissipée par chaque résistance.

La densité d'énergie par unité de surface requise pour permettre la détection d'une région chaude est le critère le plus souvent utilisé pour comparer la sensibilité de différentes techniques ou l'efficacité d'une technique utilisée dans différentes conditions. Pour une épaisseur de la puce de $5\text{ }\mu\text{m}$, la région active du circuit située entre les billes de soudure et le pont A (totalisant une longueur d'environ 3,1 mm) est observable pour une puissance appliquée de 100 mW environ. Ceci correspond à une densité d'énergie par unité de surface de 1600 W/cm^2 . Selon notre expérience et les résultats rapportés [41], lors d'analyses effectuées par FMI directement sur la circuiterie (et non pas à partir de l'endos), des densités de puissance allant de 10^3 à 10^5 W/cm^2 sont requises afin d'observer des points chauds par FMI. La sensibilité de FMI à partir de l'endos,

pour un substrat poli jusqu'à une épaisseur de $5 \mu\text{m}$, est donc comparable à celle obtenue à partir du "recto".

La figure 4.10 représente les isothermes obtenus d'un profil de température obtenu pour une puce de $5 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Il est possible d'y observer l'effet dissipatif des billes de soudure (illustrées par des points noirs). Sur cette figure, à chaque isotherme correspond une variation de température de l'ordre de 2°C environ. Le gradient de température atteint un maximum d'environ $0,1^\circ\text{C}/\mu\text{m}$.

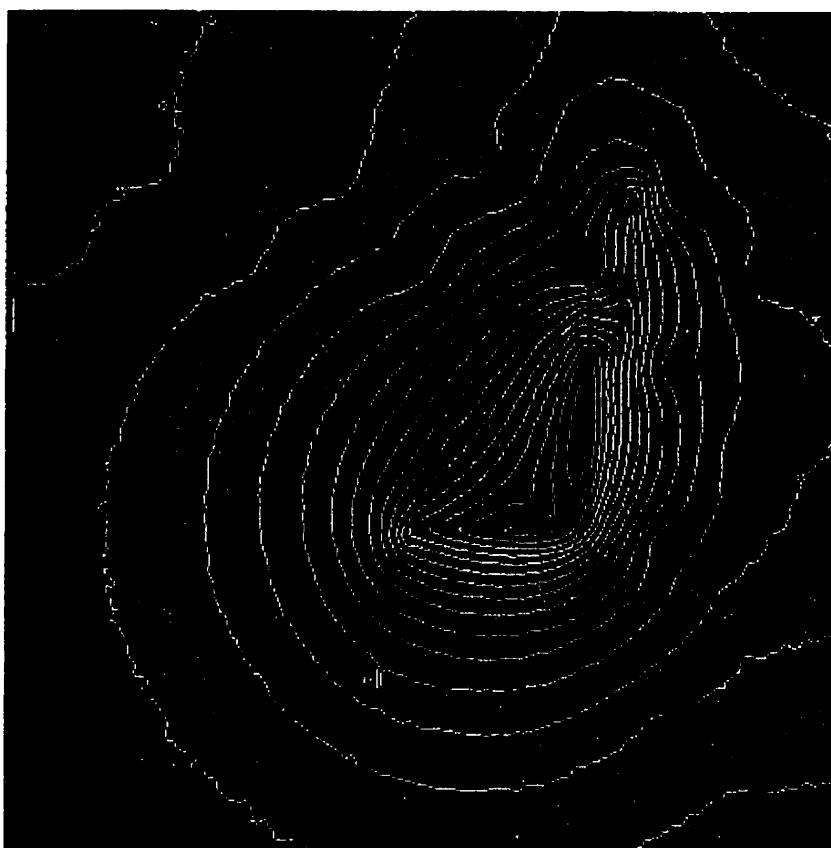


Figure 4.10. Isothermes montrant l'effet dissipatif des billes de soudure. La position approximative des billes de soudure et de la circuiterie sont superposés en noir.

L'effet mesurable ici n'est toutefois pas représentatif de la dissipation par les billes de soudure pour un dispositif en fonctionnement normal. En effet, un amincissement si important de la puce change significativement la dynamique du transfert de chaleur au sein de l'échantillon. Il semble donc impossible, à partir de cette technique, de tirer directement des conclusions importantes sur les phénomènes d'échanges thermiques au sein de flip chips. Toutefois, ces résultats expérimentaux pourraient permettre de vérifier des modèles numériques dans le cas limite où l'épaisseur de la puce est très mince. L'accord entre le modèle et les résultats expérimentaux pour de faibles épaisseurs ne permettrait pas de valider le modèle pour toute épaisseur. Toutefois, si les prédictions numériques ne concordaient pas avec les observations à faible épaisseur, il y aurait lieu de douter de la validité du modèle.

Conclusion

L'étude des caractéristiques des films créés, celle du phénomène du blanchiment et l'évaluation des possibilités d'imagerie offertes par le système d'acquisition d'images ont permis d'optimiser la technique de FMI. Ensuite, la possibilité d'effectuer des mesures absolues de température de même que celle d'utiliser FMI pour l'analyse de défaillance des dispositifs flip chips ont été démontrées.

La longueur d'absorption des films d'EuTTA/PMMA créés est de 300 nm. Des films d'au moins 1 μm d'épaisseur doivent être déposés afin d'assurer une fluorescence suffisante pendant toute la durée d'une expérience. De plus, l'étude de la dépendance du blanchiment sur l'épaisseur montre que pour un film uniforme de 1 μm d'épaisseur, que l'on pré-expose aux UV pendant environ 10 minutes, il est possible d'éliminer les artefacts spatiaux importants dus au blanchiment. Il n'y a pas de procédure définie pour la déposition des films. Le type de dispositif, sa géométrie, sa taille et la disposition du microcâblage d'or sont autant de facteurs à considérer avant de déposer un film. Selon le cas, un dépôt avec ou sans centrifugation peut être recommandable. Autant que possible, on privilégiera la centrifugation afin d'augmenter l'uniformité du film.

La sensibilité de FMI peut être optimisée en optimisant le temps d'acquisition des images et en utilisant l'expansion de dynamique. Lorsqu'on veut réduire le bruit d'image (la composante principale est ici le bruit quantique), on doit effectuer la moyenne de plusieurs ratios d'images. L'utilisation d'au moins 16 paires d'images est recommandée. Finalement, en tout temps, il est préférable de minimiser le temps d'exposition entre l'acquisition d'une paire d'images

"froide" et "chaude". Cette considération est primordiale lors de mesures absolues de température.

Une calibration adéquate d'un mélange PMMA/EuTTA/C₆H₅Cl permet d'obtenir des lectures absolues de la température. L'incertitude sur ces mesures croît avec la température mesurée et, dans le cas du mélange que nous avons utilisé, elle est de l'ordre de $\pm 2,3^{\circ}\text{C}$ à 52°C . FMI permet d'obtenir des profils de température exacts sur des structures de quelques micromètres. Toutefois, les régions où la surface n'est pas plane peuvent montrer des artefacts thermiques. L'importance de ces artefacts croît avec la réflectivité de l'échantillon.

Il a été montré que l'imagerie thermique par fluorescence (FMI) permet d'étudier le chauffage des flip chips à partir de l'endos. Trois conclusions principales peuvent être tirées de notre analyse.

- i) La largeur à mi-hauteur des distributions de température observées à partir de l'endos décroît linéairement avec l'épaisseur du dé. Ce résultat est en accord avec la prédiction théorique.
- ii) Pour une épaisseur de la puce de $5 \mu\text{m}$, le centre des distributions de température observées peut être localisé avec une précision de l'ordre de $\pm 2 \mu\text{m}$ environ. Il est donc possible d'identifier la position d'un point chaud à $\pm 2 \mu\text{m}$ près.
- iii) L'amincissement de la puce à $5 \mu\text{m}$ a aussi permis de résoudre 2 lignes séparées de $40 \mu\text{m}$. On conclut de cette mesure que si deux points chauds sont situés à une distance inférieure à $40 \mu\text{m}$ l'un de l'autre, il ne seront pas distinguables. Bien qu'en général, les points chauds soient isolés, il faut toujours considérer cette limite de résolution de la technique.

L'acquisition de deux pièces d'équipement pourrait améliorer la technique. D'abord, afin de minimiser le blanchiment, il faut réduire le temps d'exposition du film aux UV. Celui-ci est limité par le temps que prend le système informatique à acquérir chaque image. L'acquisition de chaque image prend donc au minimum 15 secondes. Il serait possible de réduire le temps d'exposition, au temps requis par la caméra pour détecter les photons, en utilisant un obturateur électronique enclenché de façon externe, i.e. indépendamment du processus d'acquisition d'images. Toutefois, l'achat d'un tel équipement ne semble pas nécessaire à ce point puisque l'application des précautions citées plus haut permet d'obtenir des résultats satisfaisants.

En ce moment, il est impossible de polir des flip chips disposés sur des PCB lorsque d'autres dispositifs ou composantes (résistances, capacités, etc.) sont situés à proximités. L'achat d'une micro-fraîseuse permettrait de polir le flip chip d'intérêt directement sur le PCB en évitant le polissage des autres composantes. En évitant de scier le PCB afin d'isoler la partie du PCB soutenant le flip chip, il serait alors possible de tester le système dans toute son intégrité. Actuellement, la faible demande pour de telles analyses ne permet toutefois pas de justifier un tel investissement.

Les applications de FMI ne se limitent bien sûr pas à l'étude des flip chips. L'imagerie par fluorescence est particulièrement utile pour l'observation de structures chauffantes ayant des dimensions de quelques micromètres de large. La technique permet, entre autres, d'observer la distribution de température sur des structures optoélectroniques. L'uniformité de la température à la surface d'absorbeurs, de lasers et de commutateurs thermo-optiques a été analysée avec succès par FMI.

Références

1. FRANCK, D.A. et TESTANI M.V. (1994). Competing Technologies for SMT: Direct Chip Attach Using Flip Chip, Wirebond, or TAB. NEPCON West '94, 1537-1549.
2. CHUNG, T., CAREY, D., GARDNER, B. et WEIGLER, B. (1994). Development of Large, High I/O Flip-Chip Technology. NEPCON West '94, 1527-1536.
3. WAGNER, L.C., TAYLOR, T.S. et WILLS, K.S. (1995). Emission Microscopy and Liquid Crystal. Microelectronic Failure Analysis, ASM International, E.U., 177-179.
4. BARTON D.L., TANGYUNYONG, P., SODEN, J.M., LIANG, A.Y., LOW F.J., ZAPLATIN, A.N., SHIVANANDAN, K. et DONOHOE, G. (1996). Infrared Light Emission From Semiconductor Devices. Proceedings of the ISTFA, 9-17.
5. LEE, T. W. (1995). Mechanical and Chemical Decapsulation. Microelectronic Failure Analysis, ASM International, E.U., 61-74.
6. BARTON, D.L. (1994). Fluorescent Microthermographic Imaging. Proceedings of the ISTFA, 87-95.
7. GRISWOLD, E.M. (1989, février). Rapport confidentiel de Northern Telecom.
8. Résultat non-publié d'une analyse effectuée pour le compte du département *Optical Network Components* chez Nortel Networks.
9. QUINN, T.J. (1983). Temperature, Academic Press, 167-240.
10. ISKRENOVIC, P.S. et MITIC, D.B. (1992). Temperature measurement by means of semiconductor diode in pulse mode. Review of Scientific Instruments, 63(5), 3182-3184.
11. BORKOWSKI, C.J. et BLALOCK, T.V. (1974). A new method of noise thermometry. Review of Scientific Instruments, 45, 151-162.
12. BISSON, J.F. (1995). Mesures de température sans les circuits intégrés sur silicium par spectroscopie Raman. Thèse de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

-
13. HIATT, J. (1981). A Method of Detecting Hot Spots on Semiconductor Using Liquid Crystals. Proceedings of the IRPS, 130-133.
 14. KHANDEKAR, S. et WILLS, K.S. (1995). Liquid Crystal Microscopy. Microelectronic Failure Analysis, ASM International, E.U., 141-144.
 15. FERRIER, S. (1997). Thermal and Optical Enhancements to Liquid Crystal Hot Spot Detection Methods. Proceedings of the ISTFA, 57-62.
 16. POTE, D., THOME, G. et GUTHRIE, T. (1988). An Overview of Infrared Thermal Imaging Techniques in the Reliability and Failure Analysis of Power Transistors, Proceedings of the ISTFA, 63-75.
 17. ZISSIS, G.J. (1976). Infrared Technology Fundamentals. Optical Engineering, 15(6), 484-497.
 18. EPPERLEIN, P.W. (1993). Jpn. J. Appl. Phys., 32, 5514.
 19. MAJUMDAR, A., CARREJO, J.P. et LAI, J. (1993). Thermal imaging using atomic force microscope. Appl. Phys. Lett., 62(20), 2501-2503.
 20. FIEGE, G.M., CRAMER, R.M. et BALK L. (1997). Temperature Profiling with Highest Spatial and Temperature Resolution by Means of Scanning Thermal Microscopy (SThM). Proceedings of the ISTFA, 51-56.
 21. VARESI, J., MUENSTER, S. et MAJUMDAR, A. (1998). High-Resolution Current and Temperature Mapping of Electronic Devices Using Scanning Joule Expansion Microscopy. IEEE 36th Annual IRPS, 169-172.
 22. KOLODNER, P. et TYSON A. (1982). Microscopic fluorescent imaging of surface temperature profiles with 0,01°C resolution. Appl. Phys. Lett., 40(9), 782-784.
 23. KOLODNER, P. et TYSON A. (1983). Remote thermal imaging with 0,7-μm spatial resolution using temperature-dependent fluorescent films. Appl. Phys. Lett., 42(1), 117-119.

-
24. WINSTON, H., MARSH, O.J., SUZUKI, C.K. et TELK, C.L. (1963). Fluorescence of Europium Thenoyltrifluoroacetone. I. Evaluation of Laser Threshold Parameters. J. Chem. Phys., 29(2), 267-274.
25. TANGYUNYONG, P. et BARTON, D.L. (1995). Photon Statistics, Film Preparation and Characterization in Fluorescent Microthermal Imaging. Proceedings of the ISTFA, 79-84.
26. TANGYUNYONG, P., LIANG, A.Y., RIGHTER, A.W., BARTON D.L. et SODEN J.M. (1996). Localizing Heat-Generating Defects Using Fluorescent Microthermal Imaging. Proceedings of the ISTFA, 55-62.
27. LIANG, A.Y., TANGYUNYONG, P., BENNETT, R.S., FLORES, R.S., SODEN, J.M. et COLE Jr., E.I. (1996). Failure Analysis of a Half-Micron CMOS IC Technology. Proceedings of the ISTFA, 149-158.
28. BHAUMIK, M.L. (1964). Quenching and Temperature Dependance of Fluorescence in Rare-Earth Chelates. J. Chem. Phys., 40(12), 3711-3715.
29. TRAVERS, B. (1996). Gale Encyclopedia of Science. (Vol. 4), Gale Research, Detroit MI, 2098-2101.
30. Fiche signalétique de l'EuTTA (1994), Acros Organics.
31. CROSBY, G., WHAN R. et ALIRE R. (1961). Intramolecular Energy Transfer in Rare Earth Chelates. Role of the Triplet State. J. Chem. Phys., 34(3), 743-748.
32. FOX, R. B. (1967). Photodegradation of High Polymers. Progress in Polymer Science. (Vol. 1), Pergamon Press, Oxford, 45-60.
33. AT200 CCD Camera System: Hardware Reference Manual (1992). Photometrics. E.U. 48 pages.
34. TOMPKINS, H.G. (1993). A User's Guide to Ellipsometry. Academic Press, E.U. 260 pages.
35. SZE, S.M. (1985). Semiconductor Devices. Physics and Technology. J. Wiley and Sons, 109-158.

-
36. Information obtenue lors d'un entretien privé avec Brian Oliver, ingénieur au sein du groupe *GaAs IC Design Integration* chez *Nortel Networks*.
 37. ADACHI, S. (1992). Physical properties of III-V semiconductor compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, InGaAsP, John Wiley & Sons, 55-62.
 38. PALIK, E. D. (1985). Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, E.U., 566.
 39. SCHRODER, D.K. (1990). Semiconductor Material and Device Characterization, John Wiley & Sons, 476-478.
 40. MELNGAILIS, J. (1991). Focused ion beam induced deposition - a review, SPIE Symp. Proc., 1465, 36-49.
 - 41 BARTON, D.L. et TANGYUNYONG, P. (1997). Scanning Fluorescent Microthermal Imaging, Proceedings of the ISTFA, 41-49.

NOTE TO USERS

**Page(s) not included in the original manuscript
are unavailable from the author or university. The
manuscript was microfilmed as received.**

107 - 108

This reproduction is the best copy available.

UMI

Annexe 1 Calcul théorique de la diffusion de chaleur dans une couche mince

Le calcul théorique qui suit permet, pour une source de chaleur ayant une forme donnée, d'évaluer la distribution de température observée à la surface d'une couche mince. En particulier, on s'intéresse à l'élargissement de cette distribution en fonction de l'épaisseur de la couche mince. Cette analyse est pertinente pour deux aspects traités dans cet ouvrage. En effet, ce modèle permet à la fois d'étudier la dissipation thermique dans un film de PMMA/EuTTA appliqué sur un dispositif et le transfert de chaleur dans un substrat de Si que l'on observe à partir de l'endos lors de l'analyse des flip chips.

La figure A1 illustre le modèle de dissipation de chaleur défini par les hypothèses décrites ci-bas. La variable $\theta(x,y) = T(x,y)-T_0$, où T_0 représente la température ambiante est utilisée pour simplifier le traitement.

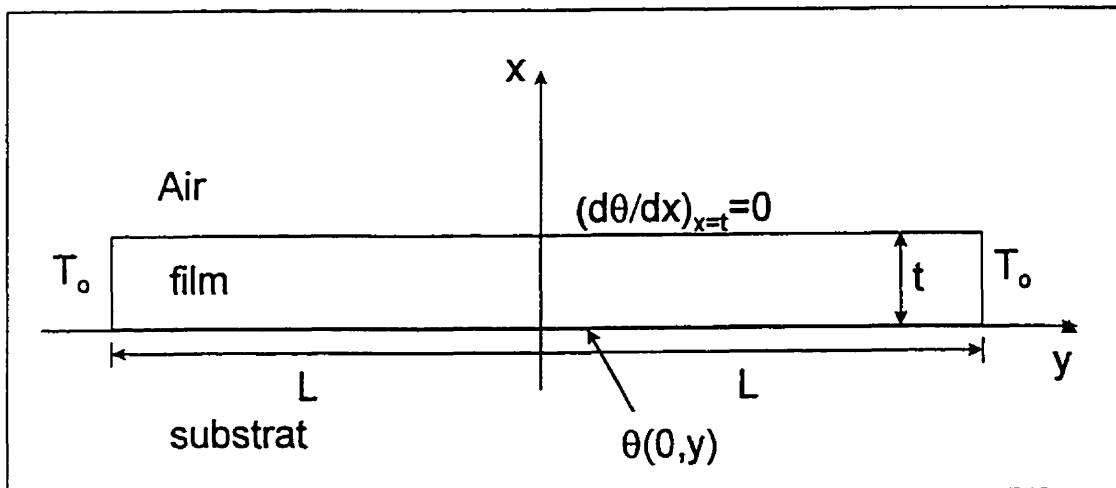


Figure A1 Géométrie et conditions frontières utilisées pour modéliser l'échange de chaleur dans les couches minces. On considère ici une couche mince de largeur $2L$ et d'épaisseur t .

- 1- Le film est d'une largeur finie ($2L$) très grande comparée à l'épaisseur du film (t).
- 2- Aux extrémités ($y = \pm L$), la température du film est égale à la température ambiante (T_0).

$$\theta(x, L) = 0 \quad (\text{A1.1})$$

- 3- L'échange de chaleur entre la surface du film et l'air est négligeable. L'air agit comme isolant.

$$\frac{d\theta}{dx}(t, y) = 0 \quad (\text{A1.2})$$

- 4- La distribution de température à l'interface film-substrat est déterminée par la forme de la structure chauffante. Afin de simplifier l'analyse, on considère que la source de chaleur engendre un profil représenté par une fonction carrée.

$$\theta(0, y) = \begin{cases} \theta_0, & -\frac{\delta}{2} < y < \frac{\delta}{2} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{A1.3})$$

On considérera $\delta \ll L$.

La symétrie du problème nécessite de plus:

$$\frac{\partial \theta}{\partial y}(x, 0) = 0 \quad (\text{A1.4})$$

En régime stationnaire, l'équation de conduction s'écrit:

$$K\nabla^2 T = K\nabla^2 \theta = q \quad (\text{A1.5})$$

où q représente le flux d'énergie généré dans le système. Dans notre cas, $q=0$ et l'équation (A1.4) peut être réécrite comme:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{A1.6})$$

Cette équation peut être résolue par séparation des variables en posant:

$$\theta(x,y) = X(x)Y(y) \quad (\text{A1.7})$$

On doit alors résoudre:

$$\frac{d^2X}{dx^2} - \varphi^2 X = 0 \quad \frac{dX}{dx}(L) = 0 \quad (\text{A1.8})$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2Y}{dy^2} + \varphi^2 Y &= 0 & Y(0) &= 0 \\ \frac{dY}{dy}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A1.9})$$

où φ représente la constante de séparation.

L'équation A1.9 admet comme solution générale:

$$Y_n(y) = \cos(\varphi_n y) \quad \text{avec } \varphi_n = \frac{(2n+1)\pi}{2L}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{A1.10})$$

Alors que la solution pour $X(x)$ est:

$$X_n(x) = B_n(e^{\varphi_n x} + e^{-\varphi_n x + 2\varphi_n L}) \quad (\text{A1.11})$$

On a donc:

$$\theta(x,y) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n [e^{\varphi_n x} + e^{-\varphi_n x + 2\varphi_n L}] \cos(\varphi_n y) \quad (\text{A1.12})$$

et la condition limite A1.3 s'écrit:

$$\theta(0,y) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n [1 + e^{2\varphi_n L}] \cos(\varphi_n y) \quad (\text{A1.13})$$

À partir de A1.3 et A1.13, et en considérant l'orthogonalité des fonctions $\cos(\varphi_n y)$ il est possible de déterminer les B_n :

$$B_n = \frac{4\theta_0}{(2n+1)\pi} \sin\left(\frac{\varphi_n \delta}{2}\right) \cdot \frac{1}{1 + e^{2\varphi_n L}} \quad (\text{A1.14})$$

En introduisant B_n dans A1.12, on obtient:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left(\frac{\varphi_n \delta}{2}\right) \cos(\varphi_n y) \cdot \frac{e^{\varphi_n x} + e^{-\varphi_n x + 2\varphi_n t}}{1 + e^{2\varphi_n t}} \quad (\text{A1.15})$$

Puisqu'on s'intéresse à la distribution à la surface du film, on pose $y=t$:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\varphi_n \delta}{2}\right) \cos(\varphi_n y)}{\cosh(\varphi_n t)} \quad (\text{A1.16})$$

Cette équation a été évaluée numériquement en fixant $\delta = 1$, $L = 200$ et en approximant la somme infinie par une somme finie pour laquelle $n = 0, 1, 2, \dots, 200$. Le calcul a été répété pour des épaisseurs t allant de 0 à 60. Le logiciel Mathematica 2.2 a été utilisé. La figure A2 présente la distribution de température obtenue pour trois valeurs de t .

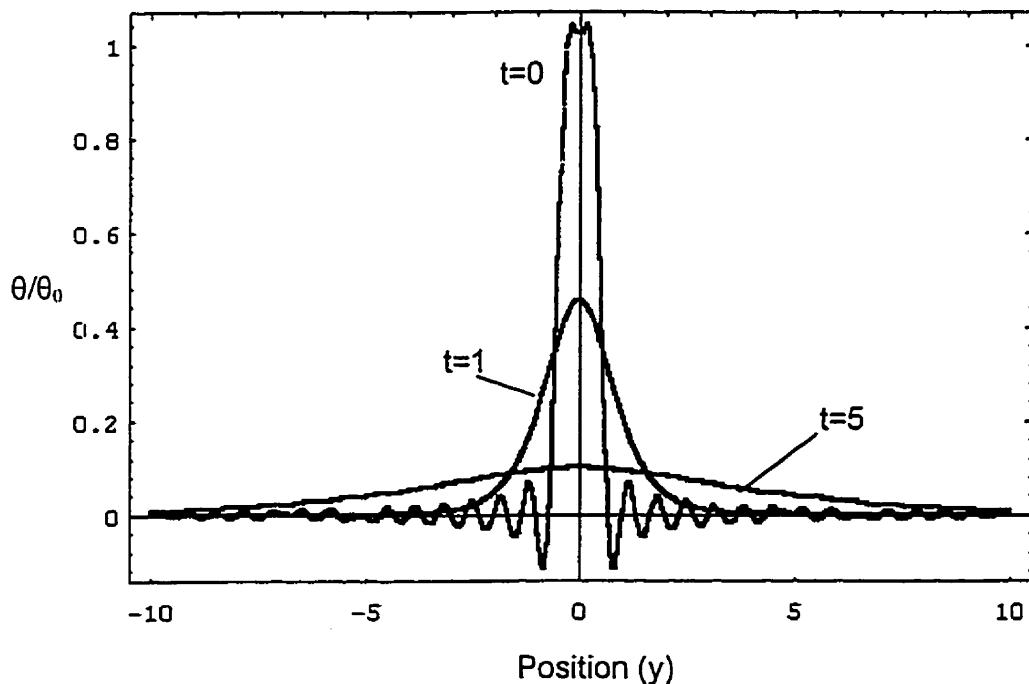


Figure A2 Résultat de l'évaluation numérique de la distribution de température à la surface de films pour lesquels $t = 0, 1$ et 5 . La courbe obtenue pour $t=0$ s'approche de la fonction carrée utilisée comme condition frontière.

La figure A3 présente la largeur à mi-hauteur (FWHM) obtenue pour les différentes épaisseurs. La largeur à mi-hauteur du profil est directement proportionnelle à l'épaisseur du film.

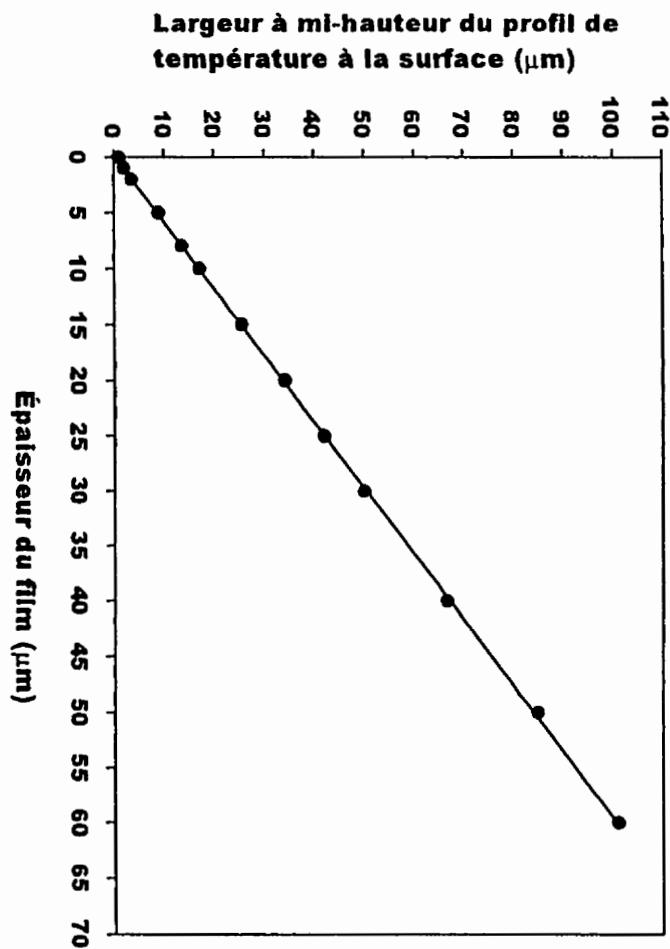


Figure A3 Largeur à mi-hauteur du profil de température calculée en surface pour différentes épaisseurs t.