50376
1997
135

N° d'ordre 2012

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE
spécialité : électronique

par
CAMBERLEIN Lionel

UNIVERSITÉ DES SC. ET TECHN. BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE LILLE I

CAPTEURS DE TEMPERATURE A RESEAU PLANAIRE DISTRIBUE DE THERMOPILES EN COUCHES MINCES

Soutenue le 09 Juin 1997 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury :	G. SALMER	Président
	D. HAUDEN	Rapporteur
	P. BEAUVILLAIN	Rapporteur
	E. CONSTANT	Directeur de Thèse
	P. GODTS	Co Directeur de Thèse
	P. THERY	Examinateur
	Y. SAMPEUR	Examinateur
	D. LECLERCQ	Examinateur

A ma famille

Remerciements

Ce travail a été effectué au Département Hyperfréquence et Semiconducteurs de l'Institut d'Electronique et de Microélectronique du Nord de l'université des sciences et technique de lille dirigé par le Professeur G. SALMER.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur SALMER qui me fait l'honneur de présider la commission d'examen.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance envers Monsieur le Professeur E. CONSTANT qui a proposé le sujet de ce travail et en a assuré la direction avec une patience et un dynamisme continus. Son soutien, sa disponibilité, ses encouragements, m'ont profondément touché.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur le Professeur D. HAUDEN de l'Université de Franche Comté et Monsieur P. BEAUVILLAIN Directeur de Recherche à l'IEF d'Orsay, qui ont accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs.

J'exprime toute ma gratitude envers Monsieur le Professeur P. THERY fondateur de la société Captec pour la symphathie et les nombreux conseils dont il m'a fait profiter.

Je remercie vivement Monsieur Y. SAMPEUR de la société ICMC pour avoir fourni à notre équipe une partie des capteurs sans lesquels la partie expérimentale de ce travail n'aurait pu être complète.

Je suis très heureux que Madame GODTS, Chargé de Recherche au DHS fasse partie de ce jury; je tiens à la remercier pour ses compétences scientifiques, sa disponibilité, l'intérêt qu'elle a porté à mes résultats de recherche, et dont les nombreux conseils lors des réalisations technologiques, m'ont été très précieux.

Je remercie sincèrement Monsieur le Professeur D. LECLERCQ pour sa disponibilité, sa compétence scientifique, ainsi que pour les nombreuses discussions que nous avons eues.

Mes remerciements vont également aux membres de l'équipe du Laboratoire Capteurs et Instrumentation et plus particuliérement à Monsieur E. GAVIOT avec qui j'ai eu plaisir à travailler ainsi que Monsieur B. VERBEKE pour l'aide qu'il m'a apporté.

Je ne serais oublier d'exprimer ma reconnaissance à l'ensemble du personnel de l'IEMN sans qui ce travail n'aurait pu voir le jour:

- Mesdames A. FATTORINI, P. LEGRY, M. MIENS
- Messieurs P. ARMANT, M. FRANCOIS, M. MULLER, A. LEROY, B. GRIMBERT, P. TILMANT, D. VANDERMOERE, JL. LORRIAUX, JL CODRON, JC. PESANT.

Je remercie JP. DEHORTER qui a assuré la reproduction de ce manuscrit.

Sommaire

Introduction 10

Chapitre I - Analyse et optimisation du fonctionnement du capteur de température USTL. Première confrontation à l'expérience sur des structures à couche épaisse

I Principe de fonctionnement d'un capteur thermoélectrique de température sans contact. Inconvénients présentés par les structures conventionnelles utilisées actuellement. 14

II Le capteur USTL. Description de la structure et analyse de son fontionnement 18

III Premières évaluation et optimisation des performances du capteur USTL. Détermination approchée de la sensibilité en tension et en température, évaluation de l'erreur minimale sur la température 22

III1 - Détermination approchée de S_V et de S_T 22

III2 - Discussion des résultats obtenus 29

III3 - Prise en compte du bruit thermique engendrée dans le capteur. Détermination de l'erreur minimale sur la mesure de la température 31

IV Etudes des principaux avantages du capteurs USTL 33

IV 1 Influence sur les performances du capteur des phénoménes de convection et conduction se produisant dans son environnement 33

IV11 Influence des phénoménes de convection 34

IV12 Les phénoménes de conduction 37

IV 2 Réalisation de mesure indépendante de l'émissivité de l'objet à mesurer38

IV 3 Comparaison avec le capteur conventionnel 39

V Vérification à partir d'une simulation 2D de l'étude éffectuée sur le capteur USTL40

V1 Hypothéses symplificatrices et structures étudiés 40

V2 Résultats obtenus et comparaison avec ceux obtenus analytiquement 44

V21 Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de l'épaisseur du substrat47

V22 Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la conductivité métallique λ_m 50

V23 Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la conductivité thermique du substrat 51

V24 Influence des phénoménes de convection 54

V3 Conclusion 54

VI Premier essai de vérification expérimentale des études et des simulations effectués sur un capteur à couche épaisse 55

VI 1 Le procédé de fabrication de capteur USTL à partir de feuilles de kapton 55

VI 2 Résultats expérimentaux et comparaisons avec la théorie développée dans ce chapitre 57

VII Conclusion 61

Chapitre II - Premières réalisations de capteurs thermiques en couche mince. Caractérisation expérimentale et comparaison avec la théorie

I Introduction 63

II Choix des matériaux utilisés pour la réalisation du capteur 64

III Procédés de fabrication du capteur USTL à partir d'une technologie « couche mince » 65

IV Caractérisation des premiers capteurs réalisés à partir de ces procédés. Interprétation des résultats obtenus et l'étude de l'influence des dimensions géométriques des éléments thermoélectriques 69

V Etude de l'influence de l'épaisseur de substrat et de l'environnement 76
V 1 Etude de l'influence de l'épaissuer de substrat 76
V 2 Influence de l'environnement 79

VI réalisation industrielle du nouveau type de capteur 80

Chapitre III - Vers des capteurs thermiques encore plus performants

I Introduction 83

II Optimisation de la structure USTL réalisée sur substrat 84
II 1 Optimisation et modification de la structure sur substrat de verre en vue d'obtenir des sensibilités plus élevées 84
II 2 Etude des modifications du substrat afin d'obtenir une sensibilité plus élevée 88
II 3 Etudes des modifications de la géométrie du puits thermique afin d'augmenter encore la sensibilité 91

III Optimisation et premières réalisations de capteurs USTL sur membranes ou sur ponts diélectriques 94
III 1 Premiéres évaluations de l'avantage apporté par une membrane 94
III 2 Premiers débuts de réalisation de capteur USTLà partir d'un substrat semi conducteur 96
III 3 Premiéres réalisations de capteurs sur membrane 97
III 4 Premiéres réalisations de capteurs sur pont 104

IV Conclusion 110

Conclusion générale 113

Bibliographie 115
Liste des figures 119

Notation

V	tension	V
N	nombre de thermocouple	
T_0	Température du puits thermique	K
T_2	Température de la jonction froide	K
T_1	Température de la jonction chaude	K
α_{eq}	pouvoir thermoélectrique équivalent	µV/K
α_{Au}	pouvoir thermoélectrique de l'or	µV/K
α_{Cn}	pouvoir thermoélectrique du constantan	µV/K
S_V	Sensibilité en tension	V/W
S_T	Sensibilité en température	µV/°C
$S\varphi$	Sensibilité en flux	µV/W/m²
A	Surface du capteur	m²
R	résistance thermique	K/W
k	facteur de géométrie	
σ	coefficient de Stephan	
φ	densité de flux	W/m²
ε	émissivité	
L	longueur d'une demi cellule	m
L_c	longueur de le zone chaude	m
L_f	longueur de la zone froide	m
l	largeur de la piste	m
$\imath$	largeur de l'interpiste	m
l_t	largeur totale du capteur	m
W	largeur d'une cellule	m
λ	conductivité thermique	W/m*K
λ_V	conductivité thermique du verre	W/m*K
λ_{Au}	conductivité thermique de l'or	W/m*K
λ_{Cn}	conductivité thermique du constantan	W/m*K
λ_m	conductivité thermique de la métallisation équivalente	W/m*K
e	épaisseur	m
e_v	épaisseur de verre	m
e_{Au}	épaisseur de la métallisation d'or	m
e_{Cn}	épaisseur de la métallisation de constantan	m
e_m	épaisseur de métallisation équivalente	m
R_m	résistance métallique équivalente	K/W
R_p, R_S	résistances thermiques du substrat	K/W
R_h	résistance de convection	K/W
h	coefficient de convection	W/m²K
R_{ST}	résistance série totale	K/W
R_{PT}	résistance paralléle équivalente	K/W
R_{ph}	résistance paralléle équivalente	K/W
P_{IR}	puissance de rayonnement infrarouge absorbée	W
P_{SIR},P_{1IR},P_{2IR}	puissances réparties	K/W
K_m	facteur de conduction	
K_h	facteur de convection	
σ_{Au}	conductivité électrique de l'or	m/Ω
σ_{Cn}	conductivité électrique du constantan	m/Ω
R_{meT}	résistance électrique métallique totale	Ω

k_B	constante de Boltzman	
Δf	bande passante	Hz
η	rendement énergétique	
F(x)	fonction	
x	rapport	
k_B	constante de boltzman	
R_{meT}	résistance électrique totale	Ω
R_{me}	résistance électrique d'une thermopile	Ω
σ_m	conductivité électrique	m/Ω
P_h, P_{1h}, P_{2h}	puissance de convection	W
R_{cond}	résistance de conduction	K/W
R_{gaz}	résistance de conduction du gaz environnent	K/W
R_b	résistance boitier	K/W
R_p	résistance thermique de pont	K/W
Re	résistance électrique des capteurs	Ω
ε_T	émissivité moyenne	
x_1, x_2	pourcentage de la largeur d'interpiste	
ε_1, ε_2	émissivité des différentes parties absorbant l'énergie	
a	coefficient de réflexion	
L_p	longueur du pont	m
b	longueur du tablier du pont	m

Introduction

INTRODUCTION GENERALE

Déterminer la température d'un matériau constitue l'une des actions les plus fréquentes de tout processus industriel et de beaucoup d'activités humaines. De nombreux procédés peuvent être utilisés et les plus simples utilisent une sonde de mesure placée dans le matériau à mesurer. Néanmoins , ce n'est pas toujours possible et l'on a de plus en plus besoin de capteurs permettant la détermination sans contact de la température et les applications de tels dispositifs sont de plus en plus nombreuses tant au niveau des utilisations domestiques que dans les dispositifs de contrôle ou de sécurité.

Bien que les dispositifs de détermination sans contact de la température aient vu le jour il y a de nombreuses années, leur taux de pénétration dans les applications grands publics reste encore très faible compte tenu de considérations d'encombrement, de coût et de performance.

Le but de ce travail est d'apporter une contribution pour surmonter cette difficulté en proposant un capteur de température sans contact fabriquable simplement sous forme collective en utilisant les technologies classiques de la micro-électronique. Il est aussi de montrer que , par sa fiabilité, sa sécurité et son très faible coût de fabrication, ce nouveau type de capteur est particulièrement adapté à l'utilisation dans des produits grands publics pour des applications dans la maison (sèche cheveu , aspirateur, grille pain, friteuse, compteur de consommation électrique etc) ou dans l'automobile (contrôle de l'environnement du conducteur).

La mesure de la température sans contact est généralement basée sur la détection du rayonnement thermique émis par le matériau étudié. Ce rayonnement électromagnétique se produit [1][2][3] dans tout le domaine spectral avec, aux températures proches de l'ambiante, un maximum de puissance en IR pour des longueurs d'onde de quelques microns. Pour le détecter, deux grands types de dispositifs peuvent être utilisés :

- les photodetecteurs utilisant les effets de photoémission , de photoconduction ou encore photovoltaïque généralement appelés détecteurs quantiques puisqu'ils impliquent une interaction directe entre les photons et la matière

- les détecteurs thermiques qui déterminent le rayonnement en mesurant l'augmentation de température résultant de l'absorption du rayonnement [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10].

La différence fondamentale entre ces deux types de détecteurs réside dans leur réponse spectrale. La réponse des photodétecteurs dépend en premier lieu de la longueur d'onde et augmente généralement avec celle ci. Les détecteurs thermiques fonctionnent par contre à sensibilité pratiquement constante dans de très large bande de fréquence et sont donc particulièrement bien adaptés à la détermination du rayonnement thermique qui est émis par l'objet de température inconnu et qui couvre de très larges bandes de fréquences.

Trois types de détecteurs thermiques peuvent être utilisés : les détecteurs pyroélectriques , les bolomètres et les thermopiles . Dans ce travail , nous utiliserons exclusivement des thermopiles qui sont de structures très simples et présentent l'avantage considérable (surtout pour les applications que nous visons) de produire eux même le signal de mesure sans utilisation d'une tension extérieure.

Ce type de procédé est déjà utilisé dans un certain nombre de capteurs sans contact [11][12][13][14][14][15][16][17][18][19][20][21][22][23] de température qui à l'heure actuelle présente un certain nombre d'inconvénients souvent rédhibitoires pour les applications envisagées . C'est pourquoi le Professeur Thery a proposé et fait breveté en 1994 par l'Université des Sciences et Techniques de Lille (USTL) un capteur thermique distribué d'utilisation beaucoup plus sure et a procédé aux premières réalisations en utilisant une technologie "couche épaisse".

Le but du travail qui, à peu près à la même époque, m'a été confié a été de concevoir, d'optimiser, de réaliser en couche mince et en utilisant les technologies de la micro-

électronique ce nouveau type de capteurs. Le mémoire présenté se propose de décrire tour à tour les différentes étapes de cette étude qui se décompose en quatre parties.

Dans une première , nous nous proposons de décrire et d'analyser le fonctionnement du nouveau capteur thermoélectrique sans contact proposé par le Professeur Thery et de présenter ses avantages et aussi ses inconvénients par rapport au dispositif classique. Utilisant successivement les résultats de calculs analytiques originaux puis de simulation ainsi que les premiers résultats obtenus expérimentalement sur des structures en couches épaisses , nous tirons les conclusions essentielles sur l'optimisation de ce composant et les résultats susceptibles d'être obtenus à partir de réalisations technologiques les plus simples [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32].

A la lumière des résultats obtenus , nous essayons dans une seconde partie de définir puis de réaliser un capteur de température en couches minces. Après avoir décrit la structure envisagée , nous décrivons les procédés technologiques qui nous ont permis sa fabrication. nous présentons ensuite les différents résultats expérimentaux obtenus et essayons de les comparer aux prévisions théoriques . Nous donnons enfin quelques indications sur le transfert de ce dispositif auprès des sociétés ICMC et Captec.

Dans une troisième partie , nous décrivons les différentes tentatives effectuées afin d'améliorer les performances des dispositifs précédents en utilisant soit des membranes soit des ponts thermiques et en utilisant d'autres matériaux tels que le GaAs. Nous comparons enfin les performances obtenus non seulement aux prévisions théoriques mais aussi à celles obtenus à partir du capteur proposé initialement par le Professeur Thery. Enfin, à la lumière de l'ensemble des résultats obtenus, nous proposons un certain nombre de structures qui tout en restant réalisables technologiquement de façon relativement simple devraient permettre d'améliorer sensiblement les performances.

Chapitre 1

Analyse et optimisation du fonctionnement du capteur de température USTL

Première confrontation à l'expérience sur des structures à couche épaisse

Chapitre I

Analyse et optimisation du fonctionnement du capteur de température USTL. Première confrontation à l'expérience sur des structures à couches épaisses.

I Principe de fonctionnement d'un capteur thermoélectronique de température sans contact .Inconvénients présentés par les structures conventionnelles utilisées actuellement.

Le principe de fonctionnement de ce type de capteur est représenté schématiquement sur la figure 1. Il est constitué essentiellement d'une surface A absorbant le rayonnement thermique émis par l'objet dont on veut mesurer la température et isolée par une résistance thermique R aussi élevée que possible du reste du capteur qui en constitue la masse thermique ou le "puits thermique" dont la température sera notée T_0. Lorsque l'on place en regard de la surface absorbante l'objet dont on veut déterminer la température T_{ob}, le rayonnement thermique qu'il émet échauffe la surface A qui prend une température de valeur T_1 d'autant plus élevée que la température de l'objet est importante. La mesure de T_1 se fait alors en utilisant l'effet Seebeck au moyen d'une thermopile ou préférablement de N thermopiles placées en série de façon à additionner les forces électromotrices. Dans ce but les jonctions chaudes et froides sont respectivement placées sur la surface absorbante A et sur le puits thermique.

La tension aux bornes de la thermopile est alors donnée par la relation:

$$V = N\,\alpha\,(T_1 - T_0) \qquad (I\,1)$$

où α est le coefficient Seebeck des jonctions utilisées

On peut alors déterminer la sensibilité en tension du détecteur S_V qui est le rapport entre la variation de la tension dV au borne de la thermopile et la variation de la puissance IR dP_{IR} absorbée par la surface A. En effet :

$$d(T1 - To) = R\, dP_{IR} \qquad (I\,2)$$

et

$$S_V = \frac{dV}{dP_{IR}} = N\,R\,\alpha \qquad (I\,3)$$

Cependant, le paramètre le plus important dans le contexte de notre étude est la sensibilité en température de l'objet défini par

$$S_T = \frac{dV}{dT_{ob}} \qquad (I\,4)$$

soit encore en utilisant la relation (I 3):

$$S_T = NR\alpha \frac{dP_{IR}}{dT_{ob}} \qquad (I\,5)$$

Dans cette relation la détermination de la puissance dissipée par le rayonnement thermique dans la surface absorbante s'effectue en utilisant la loi de Stéfan donnant la puissance rayonnée par un objet dans tout le domaine spectral. et l'on obtient finalement [33] :

$$P_{IR} = A\,\varphi_T = \frac{\sigma\,A\,k\,(T_{ob}^4 - T_1^4)}{f(\varepsilon)} \qquad (I\,6)$$

où φ_T est la somme algébrique des densités de flux auquels est soumis le capteur, σ est la constante de Stéfan ($5.7\ 10^{-8}$ W/m^2), k est un facteur géométrique qui dépend des géométries et des positions respectives de l'objet étudié et de la surface du capteur et qui tend vers 1 lorsqu'il y a influence totale entre la surface A et l'objet étudié, et :

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon_{ob}} + \frac{1}{\varepsilon_A} - 1 \qquad (I\,7)$$

où ε_{ob} et ε_A sont respectivement les émissivités de l'objet et de la surface absorbante.

Dans ces conditions , on a :

$$\frac{dP_{IR}}{dT_{ob}} = \frac{4\,\sigma A\,k\,T_{ob}^3}{f(\varepsilon)} \qquad (I\,8)$$

$$S_T(T) = \frac{4\,N\,R\,\alpha\,\sigma A\,k\,T_{ob}^3}{f(\varepsilon)} \qquad (I\,9)$$

Pour obtenir une valeur de S_T aussi grande que possible , il faut que les conditions suivantes soient réunies :

- les émissivités de l'objet étudié et de la surface absorbante doivent d'après les relations (I 7) et (I 9) être égaux à l'unité ou aussi proche que possible de cette valeur

- l'objet étudié et la surface absorbante doivent être suffisamment approchés pour être en influence totale (facteur géométrique k égal à 1)

- la surface absorbante A doit être aussi grande que possible

- le nombre N de thermopiles élémentaires constituant le capteur doit être aussi élevé que possible.

- la structure du capteur doit être conçue de façon à obtenir une résistance thermique R maximale entre le puits thermique et la surface absorbante.

En pratique, la valeur de la surface A est souvent limitée par des considérations d'encombrement ou de coût et si l'on peut obtenir une émissivité de la surface absorbante proche de 1 et placer l'objet à mesurer suffisamment près pour obtenir des conditions proches de l'influence totale , **il n'est généralement pas possible de maîtriser et même surtout de connaître l'émissivité de l'objet étudié.**

Les deux paramètres essentiels sur lesquels on peut agir relativement facilement sont d'une part le nombre N de thermopiles placées en série et la résistance thermique R entre la surface absorbante et le puits thermique constituant généralement la face arrière du capteur (fig 1). Cependant, N ne peut être trop élevé compte tenu de considérations d'encombrement et surtout de l'augmentation de la résistance électrique R_{el} présentée par le capteur. Par ailleurs, dans les capteurs classiques utilisés actuellement, cette condition est généralement réalisée en attaquant la partie du substrat situé sous la surface absorbante exposée aux IR. La résistance thermique et donc les sensibilités peuvent ainsi être augmentées d'un ou de deux ordres de

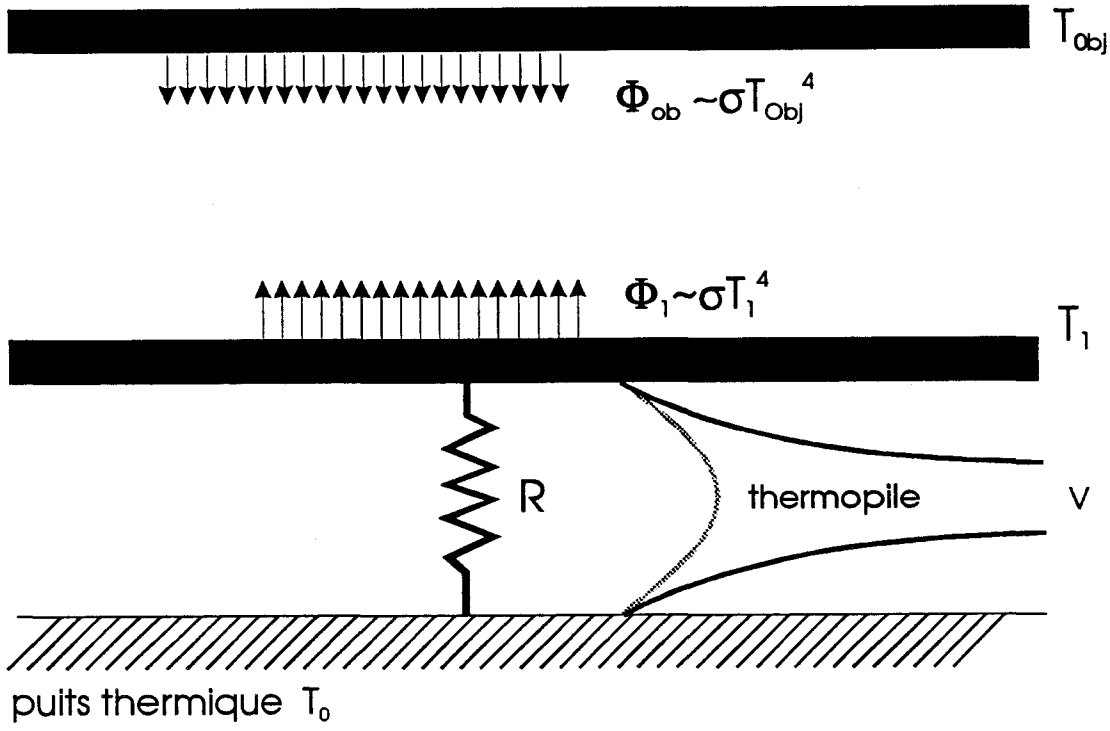


fig1 - Schéma d'un capteur thermique classique

grandeur. Mais cette façon de procéder présente un grand nombre d'inconvénients·

- nécessité d'utiliser des procédés de réalisation complexes et donc coûteux,
- capteurs fragiles mécaniquement,
- surface exposée A de dimension limitée compte tenu du fait que la face arrière attaquée ne peut être importante pour des raisons de solidité mécanique,
- nécessité de ce fait d'utiliser souvent une optique de concentration.

Le problème majeur réside cependant dans le fait que la surface A recevant le rayonnement est presque totalement isolée du reste du capteur par une résistance thermique R de valeur particulièrement élevée. Il en résulte une sensibilité particulièrement importante aux phénomènes de convection et de conduction qui généralement se traduisent par l'introduction en parallèle sur R de résistances parasites supplémentaires. Les phénomènes de convection liés au fait que le capteur est placé dans un gaz ambiant peuvent être atténués en utilisant un boîtier coûteux et augmentant largement les dimensions finales du capteur. Les phénomènes de conduction résultent généralement de l'existence d'une résistance thermique non négligeable

entre la surface exposée et l'objet à mesurer et ceci d'autant plus que pour se placer dans les conditions d'influence totale celui-ci est souvent placé au voisinage immédiat du capteur. Dans ces conditions particulières mais nécessaires , le flux thermique reçu par la surface exposée est loin d'être uniquement de type radiatif et l'exploitation pour la détermination de T_{ob} de la tension Seebeck s'avère particulièrement difficile . Des erreurs importantes peuvent ainsi être commises surtout compte tenu des fluctuations possibles avec la nature et les modifications de l'environnement du capteur des phénomènes de conduction et de convection.

Ces différentes considérations montrent que les capteurs utilisés classiquement souffrent de beaucoup d'inconvénients . Leurs utilisations semblent de nos jours limitées à des applications professionnelles . Utilisant des boîtiers et des optiques bien adaptés, ils s'avèrent très utiles pour mesurer à distance suffisante la température d'objet d'émissivité connue. Ils restent cependant à concevoir , optimiser et fabriquer le capteur de température utilisable de façon plus universelle et tout particulièrement dans les applications domestiques ou automobiles (sèche cheveu , grille pain , aspirateur, chauffage soufflant) où les conditions d'environnement sont particulièrement sévères (phénomènes de convection forcé, présence de sources chaudes parasites) et où l'émissivité des corps étudiés est le plus souvent inconnue.

Dans ce contexte, le nouveau type de capteur proposé par l'USTL semble particulièrement séduisant et nous nous proposons de décrire son principe de fonctionnement.

II LE CAPTEUR USTL. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE ET ANALYSE DE SON FONCTIONNEMENT

Comparé au capteur conventionnel, le capteur proposé par l'USTL présente une structure fort différente caractérisée par une distribution spatiale et alternative des jonctions chaudes et froides. Alors que dans le capteur classique, la différence de température entre les deux jonctions de température notée T_1 et T_2 de la thermopile résulte de la dissymétrie et des

valeurs très différentes présentées par la résistance thermique jonction- puits thermique, dans la structure USTL la différence T_1 - T_2 résulte des valeurs très différentes de l'émissivité IR correspondant aux deux jonctions qui présentent par ailleurs des résistances thermiques jonction puits thermique quasi identiques mais beaucoup plus faibles que celles caractérisant la structure conventionnelle.

De ce fait comme nous l'étudierons de façon plus précise ultérieurement, les flux thermiques résultant des phénomènes de conduction et de convection se produisant au voisinage du capteur provoquent un échauffement identique des deux jonctions et la tension Seebeck de sortie du capteur qui ne dépend que de la différence entre T_1 et T_2 n'est pas modifiée et ne dépend que des phénomènes radiatifs. Le capteur USTL doit ainsi être beaucoup moins sensible aux caractéristiques de son environnement et à ses fluctuations.

En pratique, le capteur USTL est constitué par l'association en série d'un très grand nombre de thermopiles. Comme le représente la fig 2a, il est constitué par la juxtaposition de bandes métalliques (longueur L, largeur l) constituées de métaux différents caractérisés par un coefficient Seebeck relativement important (par exemple Or (Au) et Constantan (Cn) dans la description que nous allons effectuer du capteur). Les bandes métalliques sont déposées sur un substrat isolant d'épaisseur e dont la face arrière est métallisée et constitue le "puits thermique" de température To du dispositif.

La dissymétrie en émissivité IR est alors réalisée en déposant alternativement des bandes de longueur L absorbant ou réfléchissant le rayonnement centrées respectivement sur ce qui sera la jonction chaude et sur ce qui sera la jonction froide de la thermopile.

Afin de faciliter la réalisation technologique du dispositif, la structure généralement fabriquée (fig 3) est un peu différente mais possède quasiment les mêmes propriétés thermoélectriques et infrarouge. Les thermopiles sont réalisées en déposant une bande de

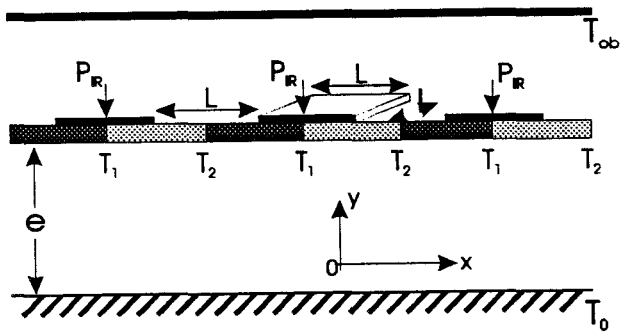


fig 2a - Association en série de cellules du capteur USTL

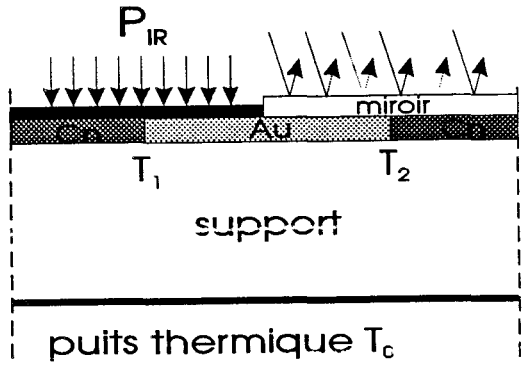


fig 2b - Structure d'une cellule du capteur USTL

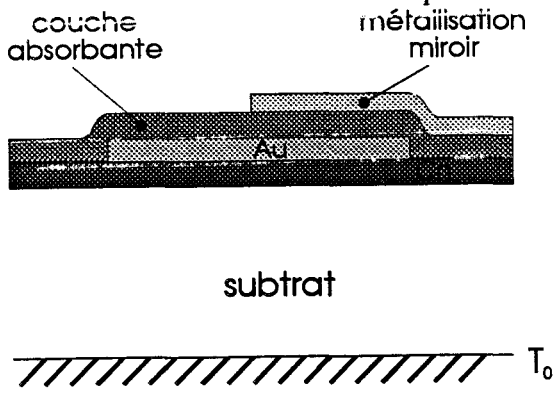


fig 3 - Schéma d'une cellule du capteur USTL
réalisée en couche mince

largeur l mais de très grande longueur de Constantan. Sur cette première bande métallique on superpose alors des plots d'Au de même largeur, de longueurs L équidistants et séparés par une distance L. Compte tenu des différences importantes de conductivité électrique des deux métaux, le plot d'Au court-circuite pratiquement la bande métallique en Cn et au niveau des propriétés thermoélectroniques, la structure de la figure 3 se comporte quasiment comme celle représentée fig 2b. Toutes les métallisations du dispositif sont alors recouvertes d'un

diélectrique absorbant l'infrarouge et finalement des plots métalliques réfléchissants, centrés sur la jonction froide et caractérisés par une longueur L sont déposés sur la couche isolante. Compte tenu du fait que l'énergie infrarouge est réfléchie par le plot métallique, la couche absorbante située sous celui ci ne joue aucun rôle en IR mais par contre évite de court-circuiter au niveau électrique la jonction froide (fig 3)[34][34][36][37][38].

Si l'on veut augmenter la sensibilité du capteur, la relation (I 3) montre qu'il est en principe intéressant d'augmenter le nombre N de thermopiles élémentaires. Ceci peut être réalisé en mettant en série suivant une direction de l'espace (axe Ox) un nombre élevé de cellules élémentaires. Cependant, si l'on veut modifier à volonté la valeur et la forme de la surface (supposée plane) exposée aux rayonnement, il est commode et même nécessaire de travailler dans un espace à deux dimensions (axe Ox et Oz). On dépose alors (fig 4) parallèlement à l'axe Ox sur le substrat isolant N bandes ou **pistes** métalliques de Cn revêtu de plots d'or et séparées par une distance que nous noterons i. Afin d'additionner les forces électromotrices élémentaires, les extrémités des bandes sont reliées électriquement suivant le schéma de la fig 4.

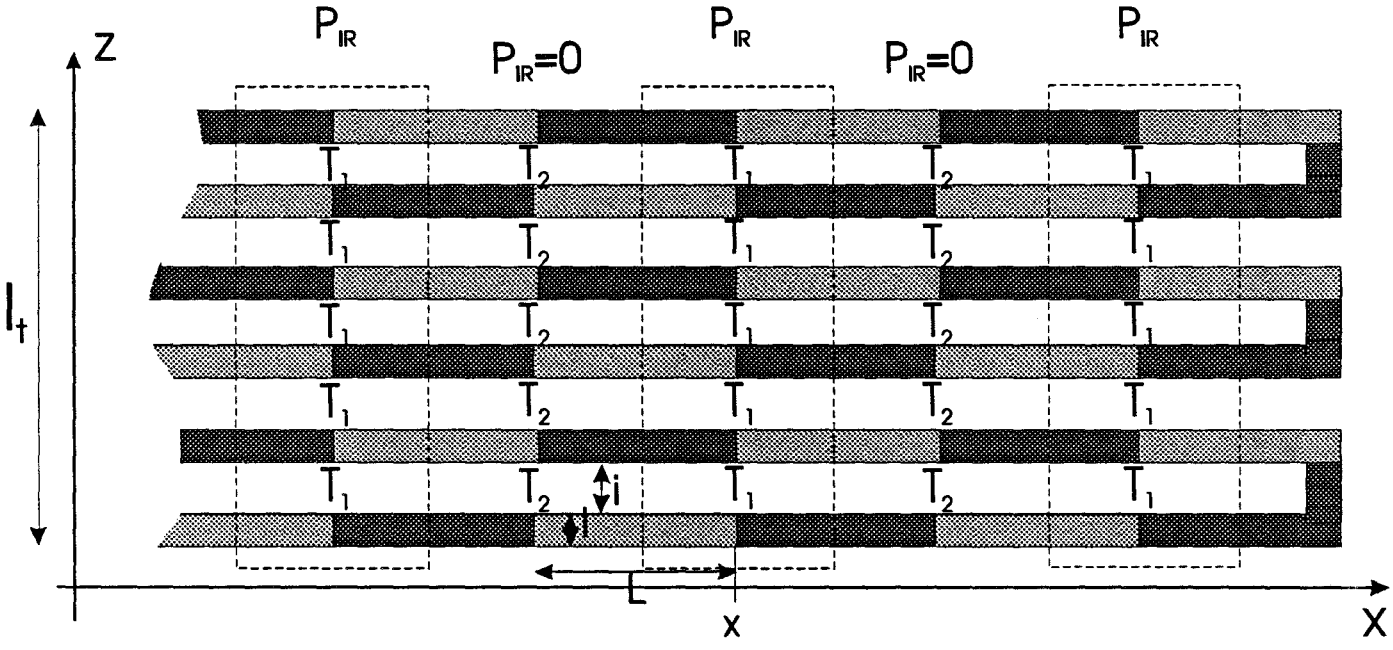


fig 4 - Vue de dessus d'un capteur USTL

Par ailleurs, on peut noter sur la fig 4 que si l'on se déplace à abscisse x constant suivant l'axe Oz on rencontre alternativement plots d'Au et bandes de Cn non revêtus. Cet alternance permet tout en maintenant l'addition des forces électromotrices Seebeck d'utiliser une surface commune réfléchissante (ou absorbante) pour toutes les jonctions chaudes (ou froides) caractérisées par la même abscisse x, ce qui simplifie considérablement la réalisation technologique de l'ensemble. En pratique, si la surface totale du substrat est A, le nombre de thermopiles élémentaires que l'on peut associer ainsi en série est donné par la relation suivante :

$$N = \frac{A}{2\,L\,(l+i)} \qquad (I\ 10)$$

le dénominateur dans cette expression représentant la surface occupée par une thermopile élémentaire.

III Première évaluation et optimisation des performances du capteur USTL. Détermination approchée de la sensibilité en tension et en température , évaluation de l'erreur minimale sur la température.

III 1 Détermination approchée de S_V et de S_T

La modélisation du capteur USTL peut se faire en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

Certaines d'entre elles apparaissent très proches de la réalité et seront donc également utilisées dans les modélisations numériques et nous les présenterons en premier lieu. Elles résultent du fait que dans la plupart des réalisations pratiques représentées fig 4, l'intervalle entre piste ou bande métallique i est généralement plus petit que la distance entre jonction chaude et jonction froide. En conséquence, il semble possible d'admettre que la variation en fonction de z de la température lorsque l'on passe en suivant l'axe Oz d'une piste à l'autre est

relativement négligeable. Cette approximation constituera une hypothèse utilisée couramment dans ce travail où nous admettrons que la température dans le capteur **est indépendante de z.**

De cette approximation, résulte le fait que la résistance thermique R_m représentée figure 5 (liées aux bandes métalliques d'Au et de Cn déposées sur le substrat) apparaissant entre l'ensemble des jonctions d'abscisse xj et celle d'abscisse x'j est constituée (si le nombre de bandes n est suffisamment élevé) d'un nombre égal de bande métallique d'Au et de Cn (fig 4). De ce fait R_m présente toujours la même valeur quelle que soit l'abscisse xj de l'ensemble des jonctions considérées et quelque soit l'ensemble adjacent considéré abscisse x'j ou abscisse x"j. On peut calculer sa valeur en introduisant une conductivité thermique équivalente λ_m définie par la relation :

$$\lambda_m e_m = \frac{1}{1+i}\left[\lambda_{Au}\frac{e_{Au}}{2} + \lambda_{Cn} e_{Cn}\right] \qquad \text{(I 11)}$$

où e_{Au} et e_{Cn} sont respectivement les épaisseurs de métallisations d'Au et de Cn et λ_{Au} et λ_{Cn} sont les conductivités thermiques correspondantes. Dans cette expression, le facteur 1/2 utilisé pour e_{Au} résulte du fait que l'or ne recouvre qu'à moitié la métallisation de constantan. Par ailleurs le facteur l/(l + i) tient compte du fait que les métallisations de largeur l sont séparées par une "distance interpiste" égale à i et de ce fait n'occupent qu'une fraction de la surface séparant jonctions chaudes et jonctions froides et e_m est une épaisseur dont la valeur est choisie arbitrairement et **sera prise dans ce travail égale à 1 micron.** Pour une surface absorbante correspondant à un ensemble de jonctions chaudes de même abscisse de largeur totale l_t et de longueur L, la résistance thermique de métallisation R_m est alors donnée par la relation suivante:

$$R_m = \frac{L}{\lambda_m e_m l_t} \qquad \text{(I 12)}$$

L'invariance en fonction des abscisses des jonctions concernées de R_m et donc cette "symétrisation" des caractéristiques résistives de l'environnement thermique des différentes

jonctions résultent de la disposition "tête bêche " des métallisations de Cn et d'Au illustrée sur la fig 4. Elles vont nous permettre de simplifier la simulation numérique du capteur USTL et ici de faciliter sa modélisation analytique.

Dans ce dernier cas, le schéma équivalent en terme de résistances thermiques de l'ensemble des jonctions est représenté sur la fig 5. Dans la mesure où le nombre de

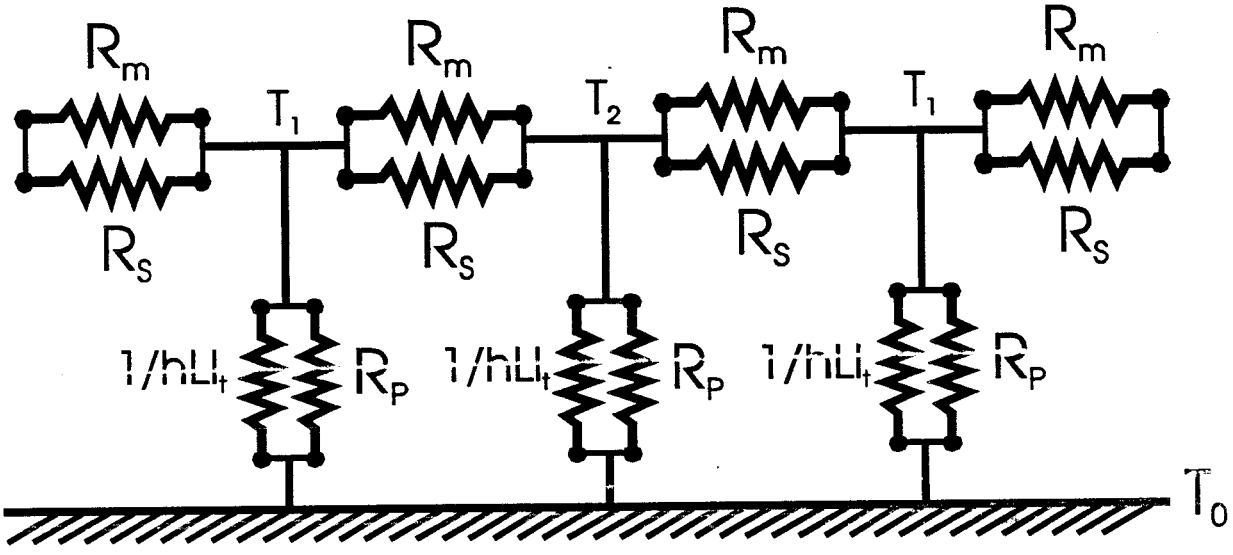


fig 5 - Schéma équivalent en terme de résistance thermique
de l'ensemble des jonctions

thermopiles constituant une des pistes du capteur est très grand, il peut être considéré comme s'étendant à l'infini vers les x positifs et négatifs. Les résistances Rp et Rs apparaissant dans le schéma caractérisent les phénomènes de conduction se produisant dans le substrat isolant tandis que R_m tient compte des phénomènes de conduction supplémentaires s'effectuant dans les métallisations. La résistance $R_h = \frac{1}{h\,L\,l_t}$ permettra de tenir compte éventuellement des phénomènes de convection avec un fluide de température To se produisant au voisinage de la surface absorbante $L.l_t$ correspondant à un ensemble de jonctions chaudes (de même abscisse) ou au voisinage de la surface réfléchissante correspondant à un ensemble de jonctions froides. Compte tenu de la quasi identité (au niveau des conductivités thermiques) des structures constituant jonctions chaudes et jonctions froides, ces phénomènes de conduction devraient

intervenir de façon quasiment identique pour ces deux types de jonctions. Afin de simplifier le déroulement du calcul analytique et l'expression des résultats obtenus, il est commode d'introduire et de représenter figure 6:

- la résistance série totale R_{ST} donnée par la relation:

$$R_{ST} = \frac{R_m R_S}{R_m + R_S} \qquad (I\ 13)$$

- la résistance parallèle équivalente R_{ph}:

$$R_{ph} = \frac{R_p R_h}{R_p + R_h} \qquad (I\ 15)$$

Le traitement du réseau de conductances thermiques représentées sur la fig 6 implique dans la modélisation analytique des hypothèses simplificatrices supplémentaires: concernant les puissances infrarouges absorbées par le capteur, nous admettrons (fig 6) que la puissance P_{IR} de rayonnement infrarouge captée par les surfaces absorbantes arrive de façon ponctuelle aux noeuds du réseau c'est à dire sur les jonctions de température T_1 (jonctions chaudes) et n'est donc pas distribuée (comme c'est le cas dans la réalité) de façon délocalisée sur la longueur L correspondant à la totalité des résistances R_S et R_m. De la même façon nous admettrons (fig 6) qu'aucune puissance n'arrive sur les jonctions froides de température T_2.

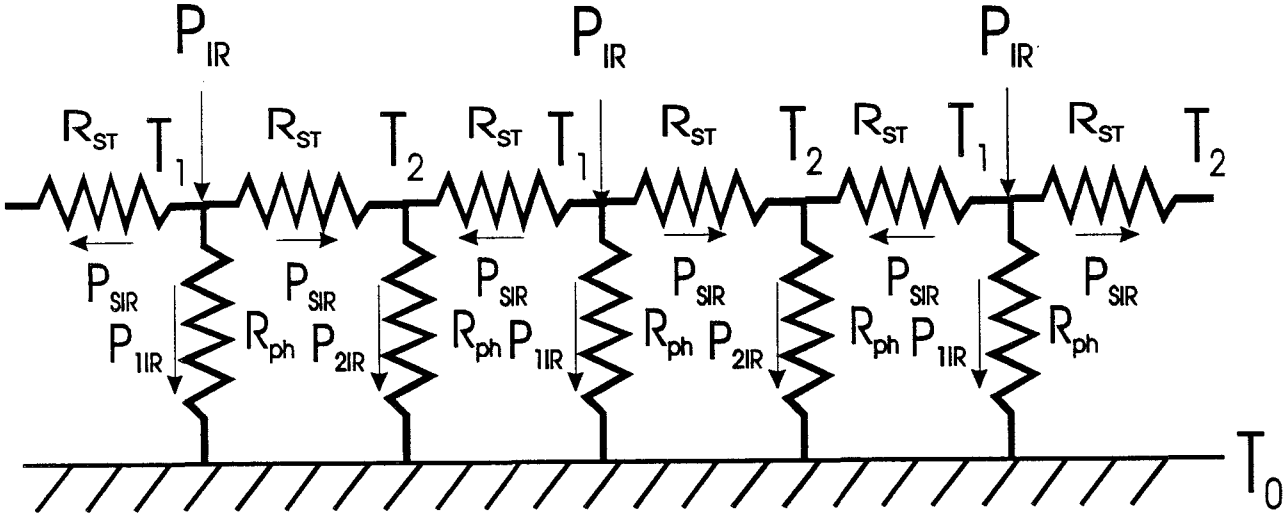


fig 6 - Réseau de résistances et de puissance IR
caractérisant le capteur de l'USTL

Dans ces conditions, compte tenu d'une part de l'extension à l'infini du réseau de résistances représenté sur la fig 6 et d'autre part de l'identité de la cellule élémentaire, les équations régissant les répartitions des puissances P_{IR} , P_{SIR}, P_{1IR}, P_{2IR} définies sur la fig 6 ne peuvent être que les suivantes :

$$P_{IR} = 2\,P_{SIR} + P_{1IR} \qquad \text{(I 16)}$$

$$P_{2IR} = 2\,P_{SIR} \qquad \text{(I 17)}$$

On peut en déduire les températures T_1, T_2 caractérisant les sources chaudes et froides au moyen des relations :

$$T_1 - T_2 = R_{ST} \cdot P_{SIR} \qquad \text{(I 18)}$$

$$T_2 - T_0 = R_{ph} \cdot P_{2IR} \qquad \text{(I 19)}$$

Un calcul simple utilisant les relations (I 16) et (I 17) permet d'obtenir les relations importantes suivantes:

$$T_1 - T_2 = \frac{P_{IR}\, R_{ST}\, R_{ph}}{R_{ST} + 4R_{ph}} \qquad \text{(I 20)}$$

et

$$\frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_2} = 2\frac{R_{ph}}{R_{ST}} \qquad \text{(I 21)}$$

L'ordre de grandeur de T_1 et T_2 peut maintenant s'obtenir à partir des relations précédentes en prenant des expressions très simplifiées de R_S et de R_P pour une largeur donnée l_t des surfaces absorbantes soient:

$$R_S = \frac{1}{\lambda}\frac{L}{l_t\, e} \qquad \text{(I 22)}$$

$$R_P = \frac{1}{\lambda}\frac{e}{L\, l_t} \qquad \text{(I 23)}$$

Bien entendu, un calcul à deux dimensions sera nécessaire pour déterminer de façon plus exacte R_S et R_P. Néanmoins les relations (I 22) et (I 23) vont nous permettre une première estimation des sensibilités du capteur USTL.

Connaissant R_S et R_P, on en déduit facilement les valeurs de R_{ST} et de R_{ph} soient:

$$R_{ST} = \frac{L}{l_t(\lambda e + \lambda_m e_m)} = \frac{L}{l_t\ \lambda\ e\ K_m} \qquad (I\ 24)$$

$$\text{avec } K_m = 1 + \frac{\lambda_m e_m}{\lambda\ e} \qquad (I\ 25)$$

$$R_{ph} = \frac{e}{L\, l_t\ \lambda\, K_h} \qquad (I\ 26)$$

$$\text{avec } K_h = 1 + \frac{e\ h}{\lambda} \qquad (I\ 27)$$

Dans ces expressions les facteurs K_m et K_h prennent en compte d'une part les phénomènes de conduction dans les métallisations et d'autre part les phénomènes de convection avec un fluide à la température ambiante. On peut noter que K_m comme K_h tendent vers 1 lorsque le phénomène concerné devient négligeable.

La détermination de la différence de température (T_1 - T_2) peut maintenant s'effectuer à partir de la relation (I 20) si l'on connaît la puissance P_{IR}. Introduisons dans ce but la densité de flux émis par l'objet à mesurer et effectivement absorbée par unité de surface absorbante φ . P_{IR} est alors donnée par la relation suivante:

$$P_{IR} = \varphi\ .\ L * lt \qquad (I\ 28)$$

L'expression finale obtenue est alors la suivante :

$$T_1 - T_2 = \frac{\varphi\ L}{\lambda} F(x) \qquad (I\ 29)$$

où

$$F(x) = \frac{x}{x^2 K_h + 4K_m} \qquad (I\ 30)$$

$$\text{avec } x = L/e$$

On remarque que les résultats obtenus ne dépendent pas de l_t, largeur de la surface exposée au rayonnement et ceci résulte du fait que nous avons admis que la température du capteur ne dépendait pas de z.

Pour obtenir la sensibilité en tension S_V de l'ensemble du capteur, il faut introduire le coefficient Seebeck caractérisant la thermopile élémentaire. Pour déterminer ce coefficient, il faut tenir compte du fait que (fig 3) la métallisation de l'or est déposée sur la bande de constantan. De ce fait , le coefficient thermoélectrique est légèrement diminué par rapport à une simple jonction, il peut être calculé par la relation suivante :

$$\alpha_{eq} = \frac{(\alpha_{Cn} - \alpha_{Au})\,\sigma_{Au} e_{Au}}{\sigma_{Au} e_{Au} + \sigma_{Cn} e_{Cn}} \qquad \text{(I 31)}$$

où σ_{Au} et σ_{Cn} sont les conductivités **électriques** respectivement de l'or et du constantan.

Pour déterminer S_V, il faut aussi connaître le nombre N de thermopiles mis en série. N peut se déterminer à partir de la surface totale du capteur A à partir de la relation (I 10). La tension Seebeck aux bornes de l'ensemble du capteur résultant de la densité de flux φ est alors donnée par :

$$V = N.\alpha_{eq}.(T_1 - T_2)$$

soit

$$= \alpha_{eq}\ A\ \varphi\ F(x) \frac{1}{2\,\lambda\,(l+i)} \qquad \text{(I 32)}$$

Notons que dans cette relation le produit $A\varphi$ peut être considéré comme la puissance Infra rouge P_{IRT} utilisable par le capteur et l'on peut donc obtenir la sensibilité en tension :

$$S_V = \frac{V}{P_{IR}} = \alpha_{eq}\ F(x) \frac{1}{2\,\lambda\,(l+i)} \qquad \text{(I 33)}$$

La sensibilité en température du capteur peut se calculer à partir de la relation (I 32) en calculant la variation dV résultant d'une variation de la densité de flux $d\varphi$ correspondant à une variation de la température de l'objet de 1 K. $d\varphi$ peut se calculer immédiatement à partir de la relation (I 8) en tenant compte que $d\varphi = dP_{IR}/A$ et l'on obtient finalement :

$$S_T = 2\,\sigma \frac{k}{f(\varepsilon)}\ T_{ob}^3\ A\ \alpha_{eq}\ F(x) \frac{1}{\lambda\,(l+i)} \qquad \text{(I 34)}$$

III 2 Discussion des résultats obtenus:

On remarque, et c'est un résultat important, que S_V comme S_T ne dépendent pas directement ni de la demi longueur L de la thermopile, ni de l'épaisseur e du substrat. Ils en dépendent cependant indirectement par l'intermédiaire de leur rapport x= L/e qui intervient dans la fonction F(x).

La structure optimale sera donc celle qui sera caractérisée par une valeur de x = e/L se traduisant par une valeur de F_S maximale.

Un calcul simple montre que ce maximum est obtenu pour :

$$x = x_{opt} = 2\sqrt{\frac{K_m}{K_h}} \qquad (I\,35)$$

et a pour valeur:

$$F_{sopt} = \frac{1}{4\sqrt{K_m K_h}} \qquad (I\,36)$$

Dans ces conditions la valeur maximale de la sensibilité est égale à:

$$S_{VMax} = \frac{\alpha_{eq}}{8\lambda\sqrt{K_m K_h}\,(1+i)} \qquad (I\,37)$$

$$S_{TMax} = \sigma\, T_{ob}^3 \frac{k}{f(\varepsilon)} \alpha_{eq}\, A \frac{1}{2\lambda\sqrt{K_m K_h}\,(l+i)} \qquad (I\,38)$$

Pour une valeur donnée de l'épaisseur e du substrat isolant utilisé, les sensibilités prévues par les relations (I 37) et (I 38) ne seront obtenues que pour une valeur optimale de L donnée par :

$$L = L_{op} = 2\,e\sqrt{\frac{K_m}{K_h}} \qquad (I\,39)$$

Les relations (I 37), (I 38) et (I 39) constituent sans doute les résultats les plus importants de notre modélisation analytique et il est intéressant de les discuter un peu en détail.

Considérons tout d'abord la sensibilité maximale que l'on peut espérer obtenir avec le capteur USTL. Les relations (I 37) et (I 38) permettent de faire les constatations suivantes .

S_V et S_T croissent proportionnellement au coefficient Seebeck des jonctions; S_T est par ailleurs proportionnelle à la surface A du capteur. Il est donc essentiel de choisir les couples de matériaux caractérisés par des valeurs élevées de α_{eq} et une surface A la plus élevée possible tout en tenant compte des problèmes de facilité et de coût des réalisations technologiques et des problèmes d'encombrement.

S_V et S_T sont inversement proportionnelles à la conductivité thermique λ du substrat utilisé et l'on a donc intérêt à utiliser pour la **réalisation du substrat de base le matériau le moins conducteur possible.**

S_V et S_T sont également inversement proportionnelles à (l+i). **Il faut donc utiliser des pistes métalliques de largeur l la plus faible possible séparée par une distance i aussi petite que possible.**

S_V et S_T diminuent lorsque les phénomènes de conduction dans les métallisations deviennent importants proportionnellement au facteur :

$$\frac{1}{\sqrt{K_m}} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{\lambda_m\, e_m}{\lambda\, e}}}$$

On constate évidemment que la diminution liée aux conductivités métalliques est d'autant plus faible que λ_m est faible donc (relation I 11) que les épaisseurs de métallisation et les conductivités métalliques utilisées seront peu importantes; mais l'on peut noter que cette diminution sera aussi d'autant plus élevée que λ et e présenteront des faibles valeurs.

S_V et S_T diminuent lorsque les phénomènes de convection entre la surface exposée et le gaz ambiant supposé à la température ambiant T_0 seront importants et ceci proportionnellement au facteur :

$$\frac{1}{\sqrt{K_h}} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{e\,h}{\lambda}}}$$

On constate que la diminution sera d'autant plus importante que bien évidemment le coefficient de convection h sera important mais aussi que l'épaisseur e du substrat sera élevée et faible sa conductivité thermique.

Par ailleurs, il faut maintenant souligner que S_V et S_T seront maximales pour une valeur optimale du rapport L/e. Lorsque la conduction dans les métallisations est négligeable, la valeur de L qu'il faut choisir est :

$$L = L_{opt} = 2\,e$$

Lorsque ce n'est pas le cas, la valeur optimale de L augmente proportionnellement au facteur $(K_m)^{1/2}$ donc d'autant plus que λ_m est élevée.

La structure étant réalisée de façon optimale, il est intéressant d'évaluer l'ordre de grandeur des valeurs numériques des performances réalisables. Utilisant les relations (I 37) et (I 38), les formules pratiques suivantes peuvent être obtenues pour un coefficient de Seebeck correspondant au couple Au Cn ($\alpha_{eq} = 40\ \mu V/°C$) :

$$S_V(V/W) = \frac{2.5\ \text{volt}}{\lambda(1+i)_{micron}} \qquad (I\ 40)$$

$$S_T(\mu V) = \frac{15\ A_{mm^2}}{\lambda\ (1+i)_{micron}} \qquad (I\ 41)$$

Ces sensibilités semblent suffisantes pour de nombreuses applications . Il reste cependant à vérifier que le rapport signal sur bruit à la sortie du capteur a une valeur suffisante pour mesurer de faibles variations de température.

III 3 Prise en compte du bruit thermique engendré dans le capteur. Détermination de l'erreur minimale sur la mesure de la température.

A la tension Seebeck apparaissant à la sortie du capteur, se superposent des fluctuations de tension liées au bruit d'origine thermique engendré dans la résistance constituée par le capteur. La variation minimale dT_{min} de la température de l'objet que l'on pourra observer sera obtenue lorsque la tension Seebeck qui résultera de dT_{min} sera égale à la

fluctuation quadratique moyenne $[dV^2]^{1/2}$ de la tension aux bornes du capteur. Celle ci est donnée par la théorème de Nyquist :

$$\left[dV^2\right]^{1/2} = u_B = \sqrt{4\, k_B T\, R_{meT}\, \Delta f} \qquad (I\ 42)$$

où R_{meT} est la résistance **électrique** totale présentée par le capteur , T est la température de cette résistance qui reste proche de l'ambiante (en pratique on prendra T = 300 K) et Δf est la bande passante du système électronique d'acquisition de la tension Seebeck qui sera d'autant plus importante que la durée d'acquisition devra être rapide (en pratique pour une durée de mesure bien inférieure à la seconde , on prendra $\Delta f = 100$ Hz). En pratique, on aura :

$$u_B = 2.10^{-9}\sqrt{R_{meT}\Delta f} \qquad (I\ 43)$$

R_{meT} peut se déterminer par la relation suivante :

$$R_{meT} = N\, R_{me} \qquad (I\ 44)$$

où N est le nombre de thermopiles du capteur que l'on peut calculer à partir de la relation (I 10) et R_{me} la résistance électrique correspondant à une thermopile. Celle ci peut se calculer en introduisant une conductivité électrique σ_m définie par la relation suivante:

$$\sigma_m e_m = \sigma_{Cn} e_{Cn} + \frac{\sigma_{Au} e_{Au}}{2} \qquad (I\ 45)$$

On obtient alors :

$$R_{me} = \frac{2\,L}{\sigma_m e_m\, l} \qquad (I\ 46)$$

soit

$$R_{meT} = \frac{A}{(l+i)\, l\, \sigma_m e_m} \qquad (I\ 47)$$

dTm_{in} s'obtient utilisant (I 38) à partir de l'équation suivante (I 48) :

$$2\,10^{-9}\sqrt{\frac{A\,.\Delta f}{(l+i)\, l\, \sigma_m e_m}} = dT_{\min}\sigma \frac{k}{f(\varepsilon)}\, T_{ob}^3 \alpha_{eq}\, A \frac{1}{2\,\lambda\sqrt{K_h K_m}\,(l+i)} \qquad (I\ 48)$$

soit encore :

$$dT_{\min} = \frac{4\,10^{-9}\,\lambda\sqrt{K_m K_h}\sqrt{1+\frac{i}{l}}\,\sqrt{\Delta f}}{\sqrt{\sigma_m e_m}\,\sigma\,T_{ob}^3\,\frac{k}{f(\varepsilon)}\,\alpha_{eq}\,\sqrt{A}} \qquad \text{(I 49)}$$

Dans le cas simple où:

- $K_m = K_h = 1$
- $i = 1$
- $\frac{k}{f(\varepsilon)} = 1$
- $\alpha_{eq} = 40\mu V/°C$

on obtient finalement pour $\Delta f = 100$:

$$dT_{\min}(°C) = \frac{0.14\ \lambda}{\sqrt{\sigma_m(\text{en } 10^{-7})(A \text{ en mm}^2)}} \qquad \text{(I 50)}$$

La relation (I 49) permet de faire les constatations suivantes. L'erreur de température minimale liée au bruit thermique dans la résistance du capteur :

- est, à rapport i/l constant, **indépendante de la largeur de piste,**
- **est inversement proportionnelle à la racine de la surface du capteur.**

Par ailleurs, pour les valeurs numériques les plus courantes des constantes mises en jeu, dT_{min} est de l'ordre du dixième de degré, ce qui est bien suffisant pour beaucoup d'applications.

IV ETUDES DES PRINCIPAUX AVANTAGES DU CAPTEURS USTL.

IV 1 Influence sur les performances du capteur des phénomènes de convection et conduction se produisant dans son environnement.

La différence de température T_1 - T_2 apparaissant entre jonctions chaudes et froides du capteur et donc la tension de sortie du capteur peuvent en pratique ne pas dépendre uniquement du rayonnement thermique émis par l'objet à mesurer. Les phénomènes pouvant intervenir peuvent être de type conductif ou convectif.

Les phénomènes convectifs se produisent entre la surface du capteur et le gaz ambiant dont la température peut être différente de celle du puits thermique.

Les phénomènes de conduction peuvent se produire entre la surface du capteur et tout objet (dont celui qui est mesuré) se trouvant dans son environnement et dépendent directement de leur température et de la conductivité thermique du gaz ambiant.

Les deux types de phénomènes peuvent modifier T_1 et T_2 et se traduire par des erreurs dans la détermination de la température de l'objet que nous nous proposons ici d'évaluer dans le cas du capteur USTL.

IV 1 1 Influence des phénomènes de convection :

Ils se produisent chaque fois que la surface du capteur constituée de partie absorbante ou réfléchissante est placée dans un fluide ambiant, ce qui est pratiquement toujours le cas même lorsque le dispositif est placé dans un boîtier. Ces phénomènes sont décrits en détail dans [39][40][41][42][43][44][45][46][47][48]. Ils se traduisent par un coefficient d'échange qui permet le calcul de la puissance perdue ou gagnée par une surface A de température T_S en contact avec le fluide de température moyenne T_F :

$$P_h = h\,A.(T_S - T_F) \qquad (I\ 51)$$

Suivant le type et les conditions dans lesquels est placé le fluide gazeux en contact avec la surface, suivant les caractéristiques de la surface, h varie entre 0 et 200 et les fluctuations de P_h peuvent résulter des fluctuations de h ou de T_F.

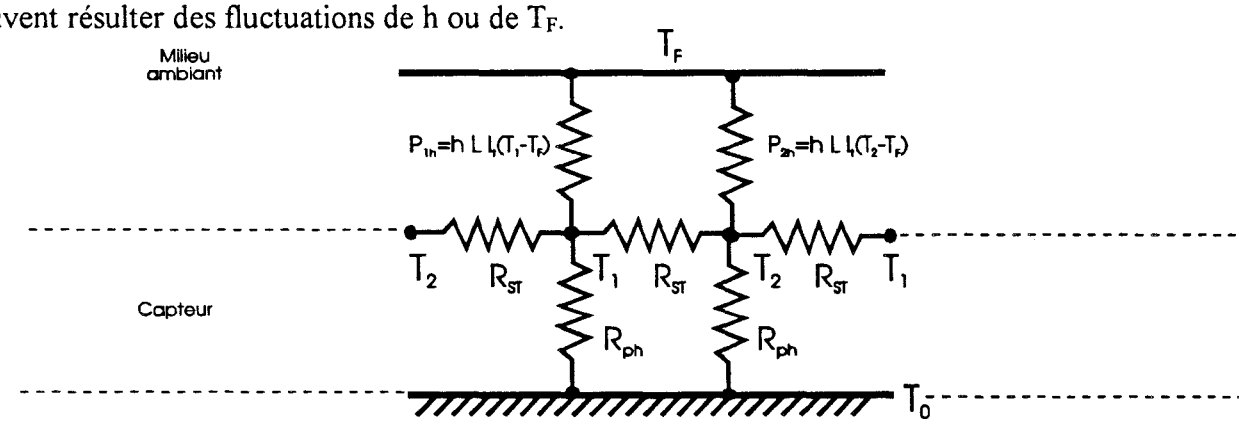


fig 7 - Schéma du réseau de résistances incluant les effets convectifs

Dans les calculs analytiques effectués en III , nous avons admis que T_F était égale à la température du puits thermique et nous avons admis implicitement que le coefficient h caractérisant les surfaces absorbantes et réfléchissantes du capteur étaient caractérisées par le même coefficient h. Il s'agit d'une propriété particulièrement intéressante du capteur USTL que nous voudrons ici souligner qui résulte de la structure totalement plane utilisée pour les surfaces absorbantes et réfléchissantes et de la très faible épaisseur et de la très forte conductivité thermique de la couche métallique utilisée pour réfléchir le rayonnement. Si cette couche métallique permet d'obtenir au niveau radiatif des propriétés très différentes, on peut admettre qu'elle joue un rôle pratiquement négligeable non seulement dans les phénomènes de convection mais aussi de conduction.

Utilisant cette propriété particulière du capteur USTL, l'influence des phénomènes de convection dans le cas d'un fluide de température quelconque peut être étudiée.

La puissance gagnée ou perdue par convection pour une surface absorbante de longueur L et de largeur lt et de température T_1 est alors égale à:

$$P_{1h} = h\,L\,l_t\,(T_1 - T_f) \qquad (I\ 52)$$

soit encore

$$P_{1h} = h\,L\,l_t\,(T_1 - T_0) + h\,L\,l_t\,(T_0 - T_f) \qquad (I\ 53)$$

De la même façon, la puissance perdue par la surface réfléchissante de température T_2 également de longueur L et de largeur lt est égale à

$$P_{2h} = h\,L\,l_t\,(T_2 - T_f) \qquad (I\ 54)$$

soit encore:

$$P_{2h} = h\,L\,l_t\,(T_2 - T_0) + h\,L\,l_t\,(T_0 - T_f) \qquad (I\ 55)$$

Seuls les premiers termes des expressions de P_{1h} et de P_{2h} (relations I 53) et (I 55) interviennent lorsque la température du fluide T_F est égale à T_0 et ces termes ont été pris en

compte en introduisant en III une résistance R_{ph} en parallèle sur R_p et nous avons montré que de ce fait la sensibilité du capteur était diminuée du facteur $\frac{1}{\sqrt{K_h}}$ soit encore du facteur :

$$\frac{1}{\sqrt{(1+\frac{e\,h}{\lambda})}}$$

De ce fait lorsque h fluctue suite à la variation de composition du gaz ambiant soit encore suite à des mouvements d'ensemble (convection forcée), on peut effectuer une erreur dans la mesure de la température. Si eh << λ, l'erreur dT_{Max} commise peut être estimée à:

$$\frac{dT_{MAX}}{T_{ob}-T_0}=\frac{e\,.dh}{\lambda}$$

où dh est la modification maximale du coefficient d'échange que l'on peut observer. Le "pire cas" est celui où dh = h et h = hmax soit 200 pour un gaz. Dans cette hypothèse extrêmement défavorable on obtient une erreur relative sur la différence de température entre la température mesurée et la référence To de:

$$\frac{200\,e}{2\,\lambda}$$

soit pour e=300μm une erreur de 3%. Même dans ces circonstances très pessimistes, l'erreur liée à la convection reste faible et l'on peut donc affirmer que dans l'énorme majorité des cas , elle doit donc être négligeable.

Lorsque la température T_f est différente de T_0, les deuxièmes termes des relations (I 53) et (I 55) interviennent. On peut cependant noter qu'ils sont strictement identiques. Par ailleurs les résistances thermiques caractérisant le noeud du réseau (fig 7) où se situe un ensemble de jonctions chaudes (température T_1) sont strictement identiques à celles caractérisant un noeud correspondant aux jonctions froides (température T_2). Dans ces conditions la variation de température T_1 résultant des phénomènes de convection liés au fait que T_f est différent de T_0 sera strictement identique à la variation de température T_2. L'effet total observé sur la tension

Seebeck sera donc nul et ce fait constitue un avantage essentiel du capteur USTL: quelle que soit T_f, les phénomènes de convection peuvent pratiquement toujours être négligés.

IV 1 2 Les phénomènes de conduction .

Ceux ci se produisent dans le fluide ambiant entre les surfaces absorbantes et réfléchissantes du capteur et les différents objets portés à des températures différentes placées au voisinage du capteur [49][50]. C'est en particulier le cas de l'objet dont on souhaite mesurer la température qui est souvent placer à très faible distance du capteur afin de récolter le maximum du rayonnement thermique émis par l'objet dans des conditions aussi proche que possible de "l'influence totale" ($k = 1$). Dans de nombreuses applications, les phénomènes de conduction sont donc très importants et surtout peuvent comme l'environnement du capteur présenter des caractéristiques qui évoluent largement en fonction du temps. Il peut donc en résulter des fluctuations des températures T_1 et T_2 et corrélativement des erreurs importantes sur la température de l'objet.

L'utilisation du capteur USTL permet de réduire souvent dans des proportions négligeables ce type d'erreur. Compte tenu de l'égalité, de la planéité des surfaces absorbantes et réfléchissantes du capteur, compte tenu de leur très grande proximité, compte tenu de la quasi identité de leur propriétés thermiques (au niveau des phénomènes de conduction), la résistance thermique objet - surface absorbante et la résistance thermique objet - surface réfléchissante sont pratiquement toujours égales. Il en résulte que la puissance IR injectée ou sortant des noeuds du réseau constitués par les jonctions chaudes est la même que celle qui sort ou rentre du noeud du réseau constitué par les jonctions froides. Les résistances thermiques caractérisant ces deux types de noeud étant les mêmes (fig 8), il en résulte immédiatement que la variation des températures T_1 et T_2 résultant de ces phénomènes de conduction parasites est identique. De ce fait la tension Seebeck dans un capteur USTL est

indépendante des phénomènes de conduction se produisant à l'extérieur du capteur et ce résultat est bien particulièrement important.

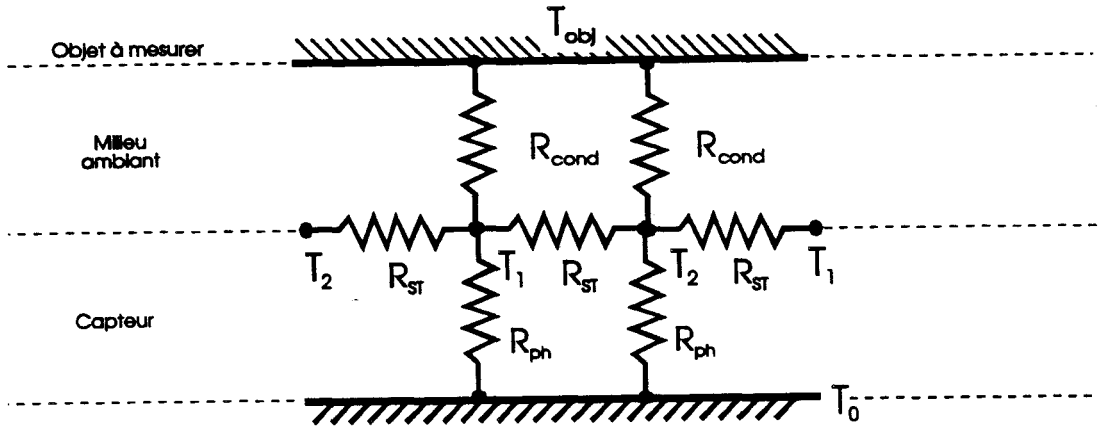


fig 8 - Schéma du réseau de résistances incluant les effets conductifs

IV 2 Réalisation de mesure indépendante de l'émissivité de l'objet à mesurer.

Comme nous avons eu l'occasion à maintes reprises de le souligner, dans le cas du capteur USTL les résistances thermiques entre jonctions chaudes et puits thermique sont identiques aux résistances thermiques entre jonctions froides et puits thermique. Elles sont par ailleurs largement plus faibles que celles des capteurs conventionnels. De fait, il est relativement facile de modifier les températures T_1 et T_2 des jonctions chaudes et froides en modifiant la température T_0 du puits thermique et cette propriété permet de réaliser facilement une mesure de la température T_{ob} indépendante de son émissivité.

Dans ce but, il suffit de placer le capteur en présence de l'objet à mesurer de température $T_{ob} > T_0$. En augmentant T_0, on augmente alors progressivement T_1 jusqu'à obtenir l'égalité $T_1 = T_{ob}$. Lorsque ceci est réalisé, la puissance absorbée par la surface absorbante est d'après la relation égale à zéro (et ceci quelque soit le coefficient multiplicateur (impliquant le facteur d'émissivité , l'absorption etc.) De ce fait, on a alors $T_1 = T_2 = T_0 = T_{ob}$ et la tension Seebeck est alors nulle. Le passage à zéro de cette tension permet donc de repérer le moment où $T_0 = T_{ob}$ de déterminer en mesurant T_0 la température de l'objet[51][52][53][54][55][56].

L'avantage considérable de cette méthode est d'être indépendante des émissivités et du coefficient d'absorption de l'objet et de la surface absorbante du capteur.

IV 3 Comparaison avec le capteur conventionnel.

La figure 9 schématisant la répartition et l'ordre de grandeur des résistances thermiques intervenant dans un capteur conventionnel et dans un capteur USTL permet de bien en situer les avantages par rapport à la structure conventionnelle. Alors que compte tenu de la symétrie, le capteur USTL apporte une résistance thermique entre la jonction chaude et le puits thermique due au substrat, identiquement pour le point froid, permet à celui ci d'être immunisé contre la convection (R_{ST} et R_{ph} << R_{gaz}), et permet d'augmenter la température de T_1 et T_2 simultanément en chauffant le substrat.

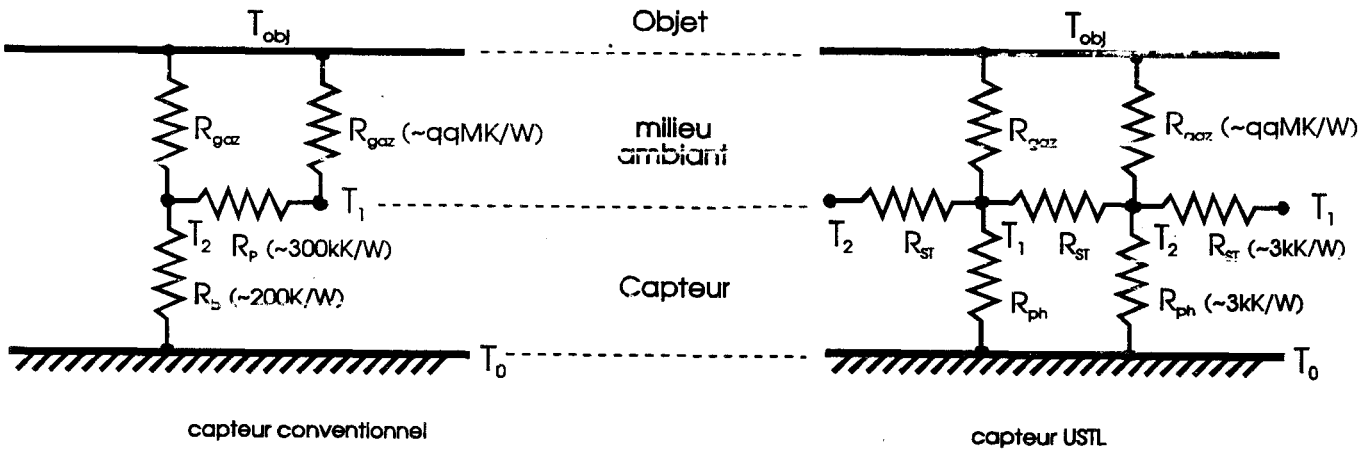


fig 9 - Schéma des réseaux de résistances des capteurs conventionnels et USTL

Au contraire, dans un capteur conventionnel, le point chaud à la température T_1 se trouve à la jonction de deux résistances thermiques R_{gaz} et R_b de valeurs voisines. Il est donc normal qu'il soit sensible à la convection. Le point froid à la température T_2 par une résistance de substrat R_b très faible se trouve pratiquement à la température T_0. Dans l'objectif de faire une mesure de température, si l'on vient à augmenter la température T_0, le point froid augmente immédiatement en température alors que la température du point chaud s'équilibrera en fonction de R_{gaz} et R_p et de la température de l'objet. Il devient donc difficile d'effectuer

avec un capteur conventionnel une mesure radiative lorsque les effets conductifs et convectifs externes ne sont pas négligeables.

V Vérification à partir d'une simulation 2 D de l'étude effectué sur le capteur USTL.

V1 Hypothéses simplificatrices et structures étudiées

Les études effectuées en III et IV ont permis d'obtenir l'ordre de grandeur des performances du capteur USTL et d'en situer les avantages par rapport au capteur classique. Elles ont cependant nécessité un certain nombre d'hypothèses simplificatrices dont il importe maintenant d'en étudier la validité. C'est pourquoi , nous exposons ici les résultats d'un simulation à deux dimensions du capteur USTL.

Dans cette simulation, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été maintenues et sont ici énumérées:

1) La densité de flux arrivant et absorbée par les surfaces absorbantes est uniforme et donc la même en tout point de cette zone. Il en est de même sur les surfaces réfléchissantes où nous admettons que cette densité de flux est nulle.

2) La température T dans le capteur est indépendante de z (fig 10).

Cette hypothèse utilisée dans les calculs analytiques sera maintenue. Elle résulte des deux fait suivants:

* Les deux longueurs L_f et L_c (fig 11 et 12) des zones froides réfléchissantes et des zones chaudes absorbantes (dans la simulation analytique, nous avons admis que des deux zones étaient égales L_c=L_f=L) sont beaucoup plus petites que les largeurs l_t des zones absorbantes et réfléchissantes. De ce fait, « les effets de bord » aux extrémités de la surface du capteur seront négligeables.

* La largeur de « l'interpiste » i est beaucoup plus petite que L_f et L_c. De ce fait la variation de la température dans l'interpiste repérée suivant l'axe Oz devrait être négligeable.

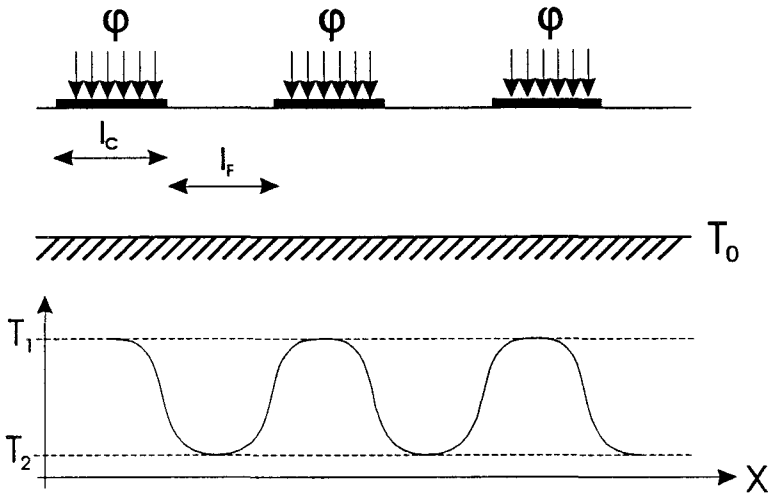


fig 10 - Structure générale d'un capteur

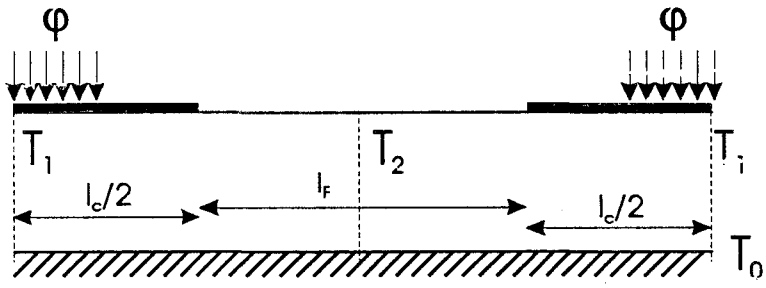


fig 11 - Structure d'une cellule

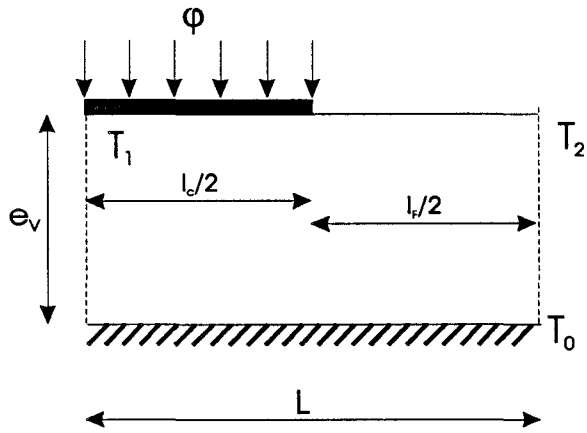


fig 12 - Structure d'une demi cellule

3) Le réseau constitué par les thermopiles associées en série s'étend pratiquement à l'infini.

Cette hypothèse implique que le capteur est composé d'un nombre suffisant de thermopiles élémentaires. S'il en est ainsi, les conditions aux limites aux extrémités du capteur n'interviennent pas; la distribution de température dans chaque thermopile élémentaire est identique (même valeur de T_1 et T_2 et de la répartition de température suivant l'axe Ox).

Dans ces conditions, le calcul numérique peut se limiter à la détermination de la carte de température dans la cellule élémentaire représentée sur la figure 13 et limitée par deux jonctions froides ou deux jonctions chaudes.

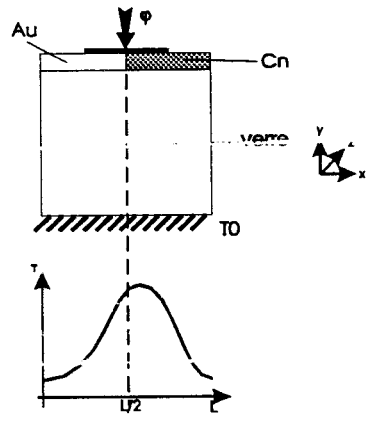


fig 13 - Evolution thermique d'une cellule élémentaire

4) Les phénomènes de conduction liés aux métallisations dans la cellule élémentaire constituée par une thermopile peuvent être traités en introduisant un plan de symétrie au milieu de cette cellule.

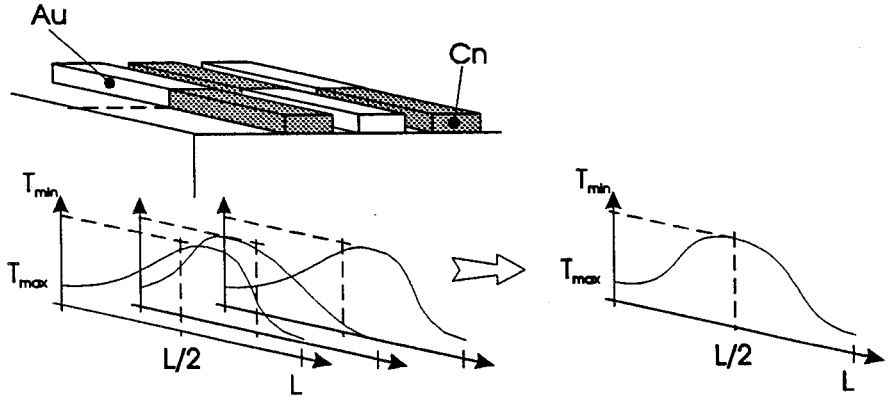


fig 14 - Evolution thermique due à la mise en paralléle de plusieurs cellules élémentaires

Comme nous l'avons vu dans l'expression analytique de la métallisation, cette hypothèse (indispensable si l'on veut limiter le calcul de la température à un espace à deux dimensions) résulte du montage « tête bêche » utilisé dans la réalisation du capteur (fig 14). De ce fait la résistance thermique entre un ensemble de jonctions chaudes et un ensemble adjacent de jonctions froides est toujours constituée d'un même nombre de métallisations en Cn et Au sur Cn et d'un même nombre d'interpistes.

C'est pourquoi dans le calcul numérique, nous tiendrons compte (comme nous l'avons fait dans la modélisation analytique) des phénomènes de conduction « superficiels » dans les métallisations en introduisant une couche équivalente d'épaisseur très faible choisie arbitrairement (en pratique e_m=1µm) caractérisée par une conductivité thermique équivalente correspondant à une moyenne pondérée effectuée suivant l'axe Oz et donnée par la relation avec e_A et λ_A l'épaisseur et la conductivité thermique du nitrure de silicium:

$$\lambda_m e_m = \frac{l}{l+i}\left[\lambda_{Au}\frac{e_{Au}}{2} + \lambda_{Cn} e_{Cn}\right] + \lambda_A\, e_A \qquad \text{(I-56)}$$

Compte tenu de l'ensemble de ces hypothèses, la cellule élémentaire que nous pouvons utiliser est représentée fig 15 avec une couche équivalente tenant compte des phénomènes de conduction dans les métallisations. On peut noter qu'elle présente comme prévu un plan de symétrie médian et de ce fait on peut limiter le calcul pratique à une demi cellule (fig 16).

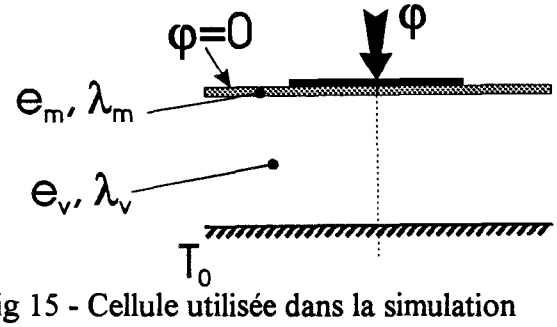


fig 15 - Cellule utilisée dans la simulation

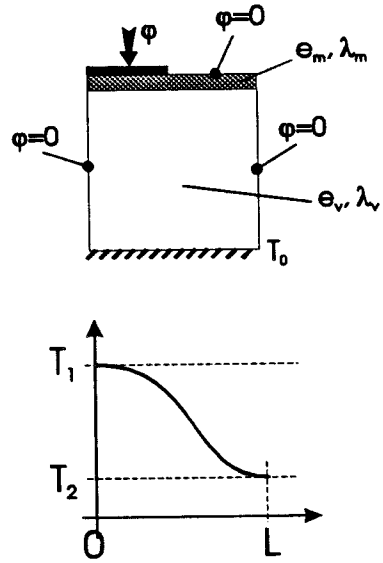


fig 16 - Demi cellule pour étude numérique

Les conditions aux limites utilisées dans le calcul et déduites des hypothèses déjà énoncées sont alors les suivantes:

-densité de flux nul sur les parties réfléchissantes (longueur $L_f/2$), densité de flux constant φ_0 sur les parties absorbantes (longueur $L_c/2$)

-température constante sur le radiateur de température maintenue à T0.

-densité de flux nul suivant Ox aux deux extrémités de la demi cellule élémentaire. Les résultats qui seront donnés seront généralement calculés en prenant un flux incident égale à $1 W/m^2$.

Le logiciel de calcul des cartes thermiques T(x,y) que nous avons utilisé est décrit en [57]

V2 Résultats obtenus et comparaison avec ceux obtenus analytiquement

Nous donnons figure 17 quelques exemples de cartes de température obtenues par simulation numérique pour différentes demi cellules étudiées. En ce qui concerne notre capteur, ce qui nous intéresse essentiellement est l'évolution de la température en fonction de x entre la température minimale T_2 caractérisant les jonctions froides et la température maximale

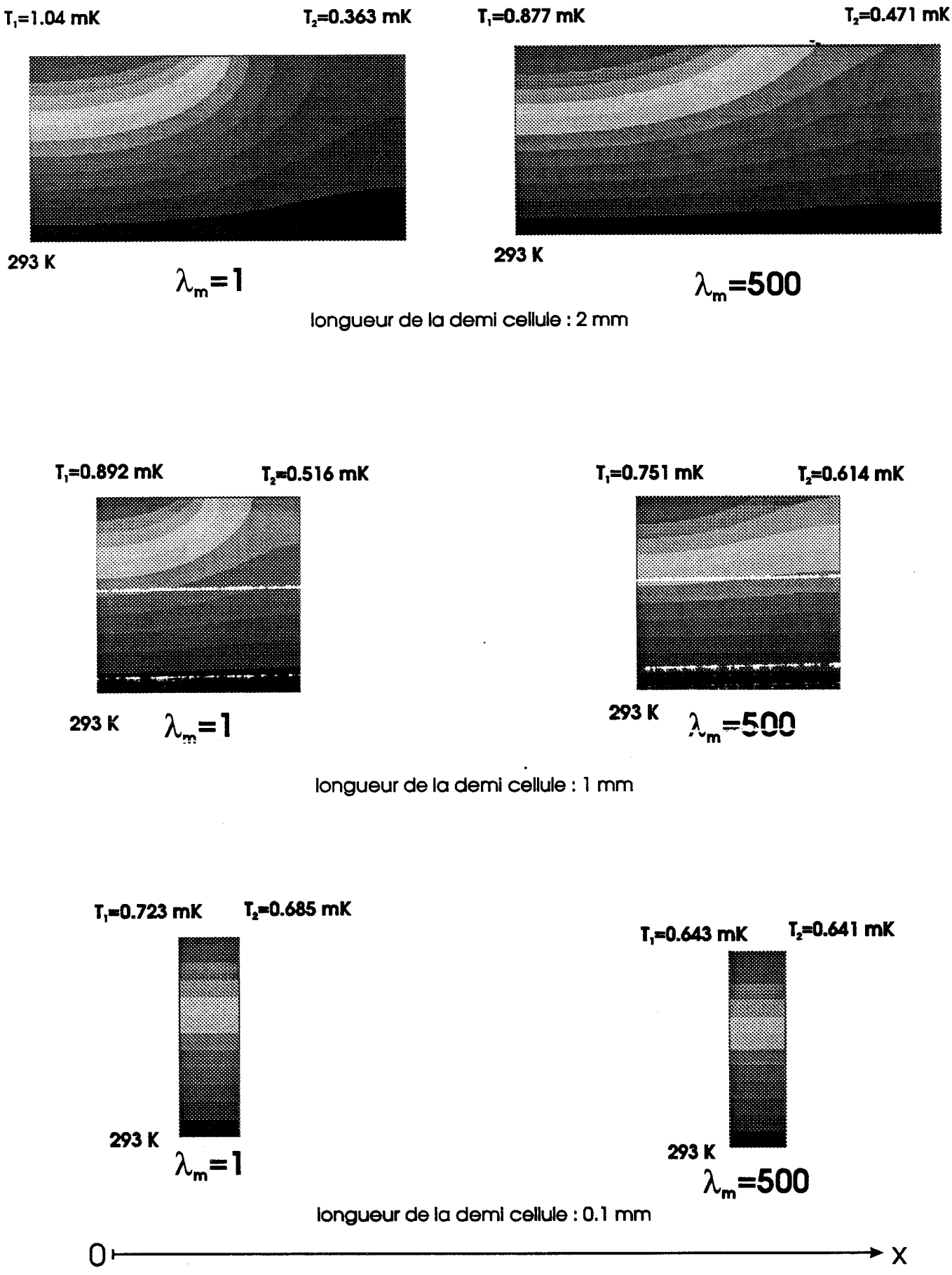


fig 17 - Cartes de température obtenues par simulation numérique pour différentes longueurs de demi cellule et pour des conductivités thermiques de surface différentes pour une épaisseur de verre de 1mm

T_1 caractérisant les sources chaudes. Un exemple de résultat numérique obtenu est représenté figure 18.

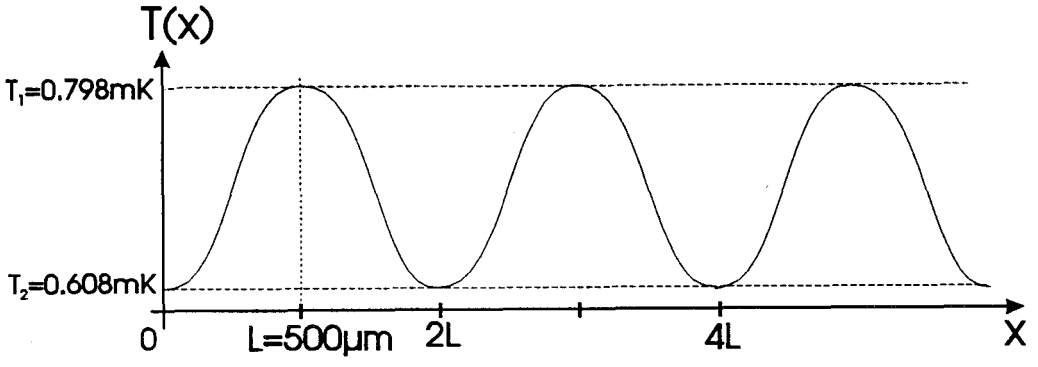


fig 18 - Evolution de la température en fonction de x pour un substrat de verre de 1mm d'épaisseur une demi cellule de 500µm pour un $\varphi_{incident}$ =1W/m²

Rappelons qu'à partir de cette évolution on peut en déduire l'évolution complète de la température T suivant l'axe Ox compte tenu d'une part de la symétrie de la structure par rapport au plan perpendiculaire à l'axe Ox correspondant aux jonctions chaudes et compte tenu d'autre part de son caractère répétitif. La tension Seebeck dépend que de la différence:

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

C'est pourquoi nous allons désormais nous limiter à l'étude des variations de cette grandeur en fonction des différents paramètres caractérisant la structure.

La première question que nous allons nous poser est de savoir dans quelle mesure il est nécessaire, comme nous l'avons fait dans l'étude analytique d'utiliser une zone réfléchissante et une zone absorbante de longueur L_f et L_c égales. La réponse apparaît sur la figure 19 où nous avons représenté l'évolution de ΔT en fonction du rapport entre L_c et L_f et l'on peut noter que ΔT passe par un maximum lorsque ces deux longueurs sont égales. C'est pourquoi désormais on se placera dans ce cas soit:

$$L_c = L_f = L$$

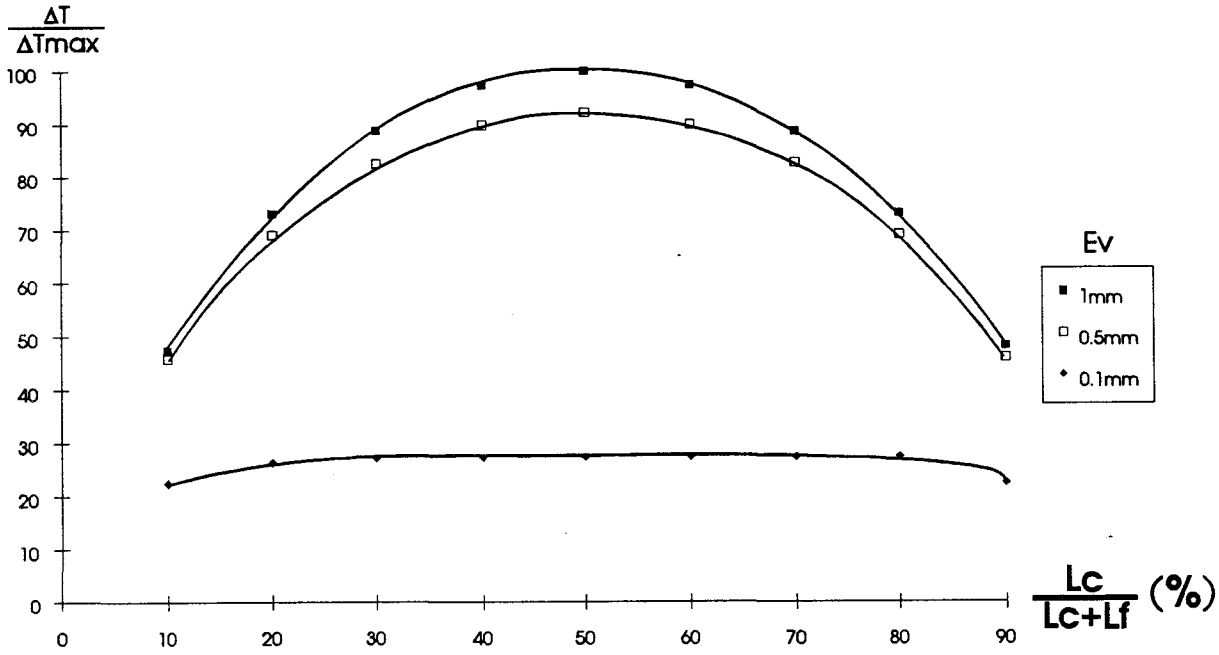


fig 19 - Evolution de la température (en %) entre les jonctions en fonction de la longueur de la zone absorbante (l_C) et de la longueur de la zone réfléchissante (l_f) et de l'épaisseur de verre (λ=1) pour L=1mm et λ_m=40

Lors de l'étude analytique, nous avons montré que la tension Seebeck déterminant la sensibilité du capteur était proportionnelle à:

$$V=N\,\alpha_{eq}\,(T_1 - T_2) = N\alpha_{eq}\,\Delta T$$

soit encore en utilisant la relation (I 10):

$$V = A\,\frac{\alpha_{eq}}{2\,(1+i)}\,\frac{\Delta T}{L} \qquad \text{(I-57)}$$

et on remarque que la sensibilité du capteur sera en conséquence proportionnelle à la quantité $\Delta T/L$. C'est pourquoi, nous allons maintenant nous intéresser à l'évolution de cette grandeur en fonction des caractéristiques géométriques ou thermiques de la structure.

V 21 Evolution du rapport ΔT/L en fonction de l'épaisseur du substrat

Lors de l'étude analytique, nous avons montré comme l'illustre la figure 20 que lorsque la conductivité métallique était négligeable le rapport $\Delta T/L$ passait par un maximum égal à 0.25 K/m pour une longueur de demi cellule égale à deux fois l'épaisseur du substrat. Les

résultats obtenus numériquement (fig 21) sont peu différents dans la mesure où ΔT/L présente un maximum un peu plus élevé 0.38 K/m pour des longueurs L sensiblement égal à e.

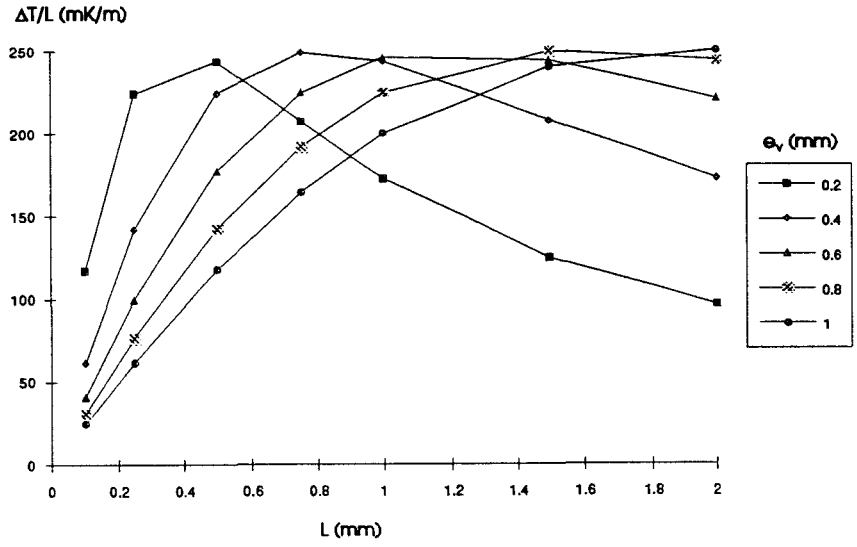


fig 20 - **Résultats analytiques** - Evolution du rapport ΔT/L en fonction de la longueur de demi cellule L et de l'épaisseur de substrat e_v, pour une conductivité thermique de substrat λ de 1 W/mK et une conductivité thermique de surface de λ_m=1 W/mK

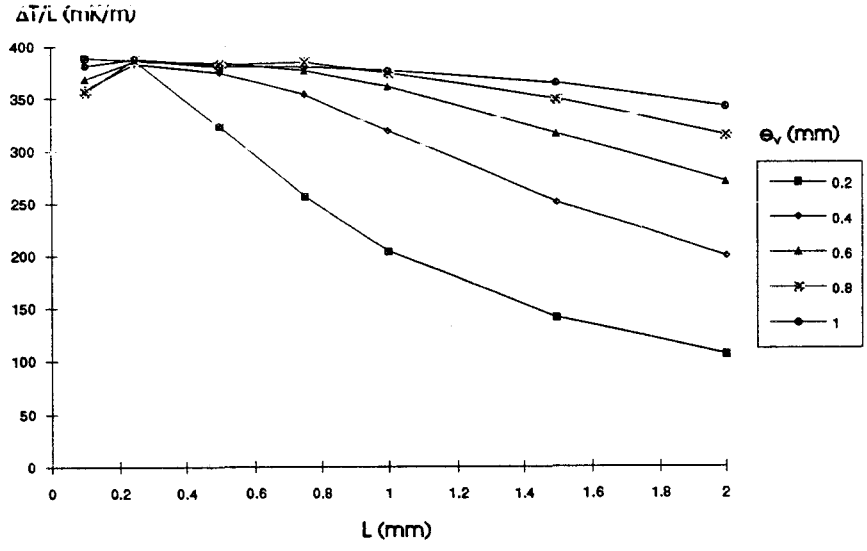


fig 21 - **Résultats numériques** - Evolution du rapport ΔT/L en fonction de la longueur de demi cellule L et de l'épaisseur de substrat e_v, pour une conductivité thermique de substrat λ de 1 W/mK et une conductivité thermique de surface de λ_m=1 W/mK

Les résultats obtenus lorsque la conductivité métallique devient non négligeable (λ_m=40 W/mK) sont représentés sur les figures 22 (résultats analytiques) et sur les figures 23 (résultats

numériques). Comme le prévoyait l'étude analytique (introduction du coefficient K_m défini par la relation I 25), $\Delta T/L$ diminue (et ceci d'autant plus que l'épaisseur du substrat est faible) et sa valeur maximale est obtenue pour des longueurs L plus importantes. Néanmoins l'influence de λ_m apparaît beaucoup plus importante dans la simulation numérique que dans la simulation analytique.

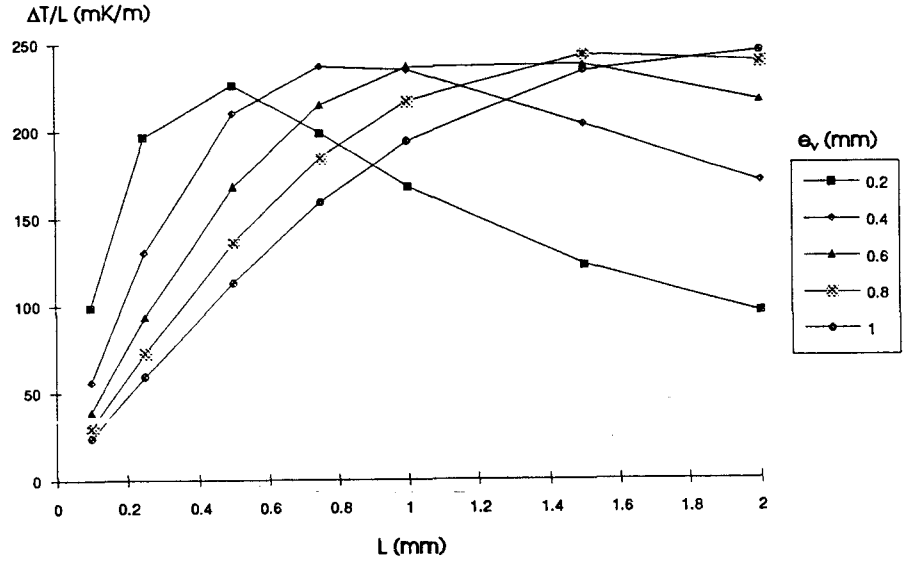


fig 22 - **Résultats analytiques** - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de l'épaisseur de substrat e_v, pour une conductivité thermique de substrat λ de 1 W/m*K et une conductivité thermique de surface de λ_m=40 W/m*K

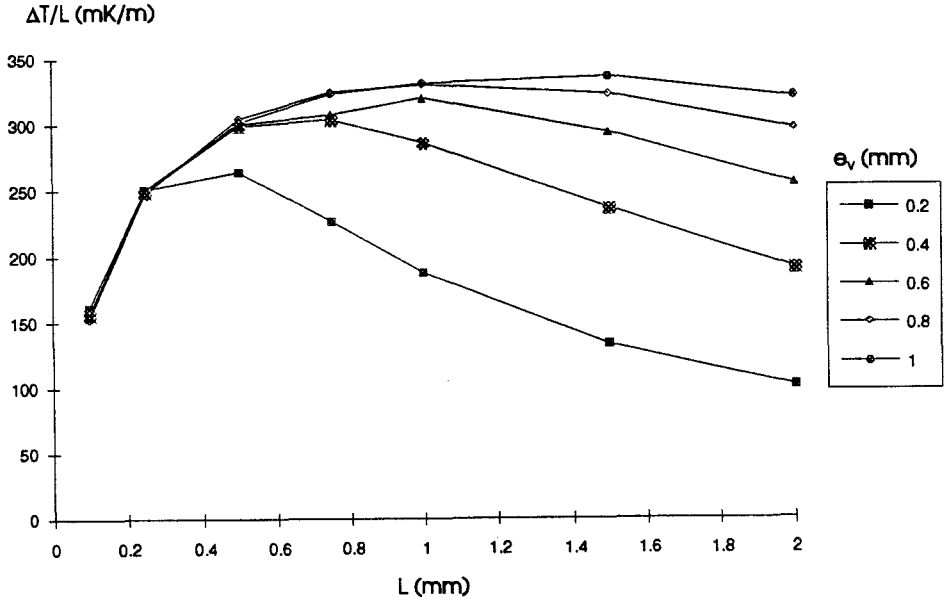


fig 23 - **Résultats numériques** - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de l'épaisseur de substrat e_v, pour une conductivité thermique de substrat λ de 1 W/m*K et une conductivité thermique de surface de λ_m=40 W/m*K

V 22 Evolution du rapport ΔT/L en fonction de la conductivité métallique λ_m

Il apparaît donc intéressant d'étudier de façon plus approfondie à épaisseur de substrat constante (e = 400μm) l'influence de λ_m et les résultats de cette étude sont reportés sur les figures 24 (résultats analytiques) et figure 25 (résultats numériques).

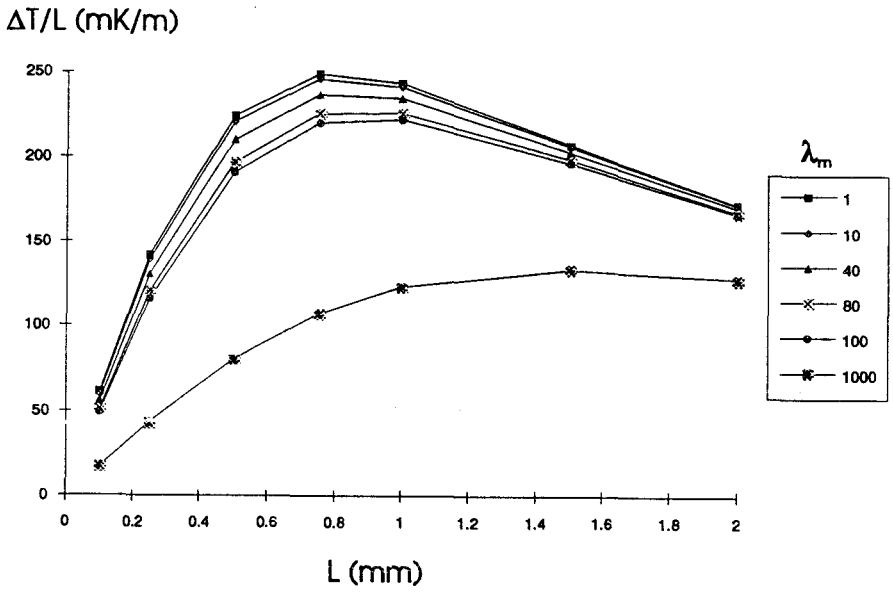


fig 24 - **Résultats analytiques** - Evolution du rapport ΔT/L en fonction de la longueur de demi cellule L et de conductivité thermique de surface λ_m pour une épaisseur de substrat de verre e_V=400μm

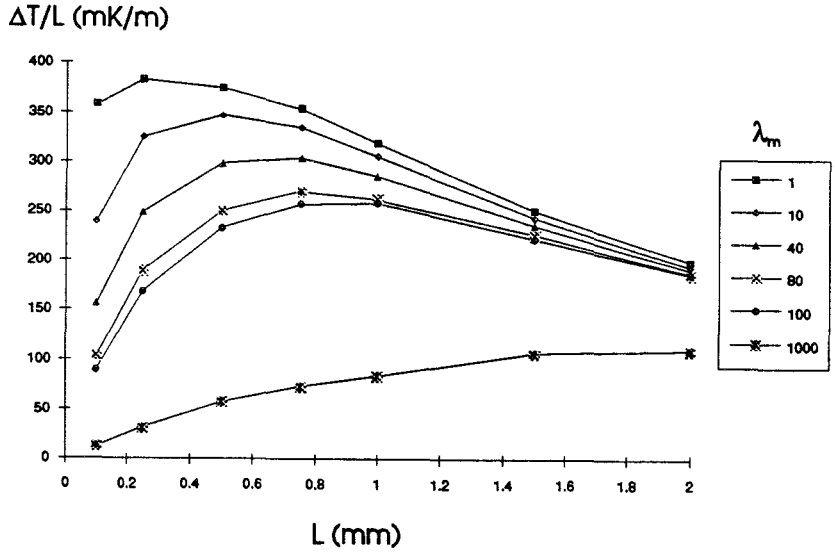


fig 25 - **Résultats numériques** - Evolution du rapport ΔT/L en fonction de la longueur de demi cellule L et de conductivité thermique de surface λ_m pour une épaisseur de substrat de verre e_V=400μm

L'étude sur ordinateur montre qu'effectivement dès que λ_m augmente on retrouve très vite des résultats voisins de ceux obtenus par le calcul analytique (pour λ_m =100, on obtient dans les deux cas un maximum proche de 0.25 K/m pour des longueurs L égales sensiblement à deux fois l'épaisseur du substrat). Pour des valeurs plus élevées de λ_m l'évolution prévue analytiquement et numériquement est assez comparable (diminution de la sensibilité par augmentation de la valeur optimale de L). Notons simplement que les valeurs obtenues sur ordinateur deviennent alors un peu inférieures à celles obtenues directement par le calcul analytique. Une comparaison plus directe et précise entre calcul analytique et numérique est d'ailleurs donnée sur la figure 26.

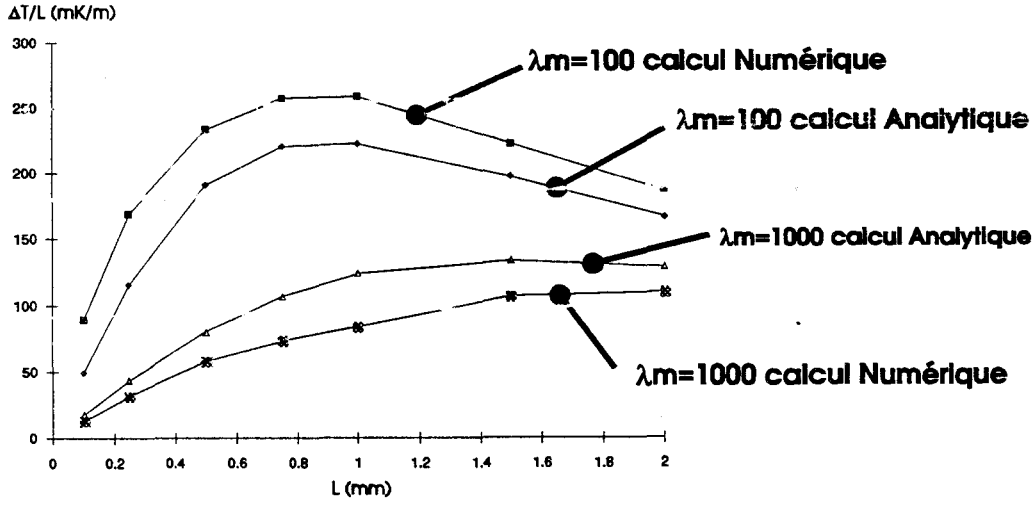


fig 26 - Evolution du rapport ΔT/L en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique de surface λ_m pour une épaisseur de substrat de verre e_V=400µm avec différents modes de calcul: **numérique et analytique**.

V 23 Evolution du rapport ΔT/L en fonction de la conductivité thermique du substrat

La théorie analytique prédisait (fig 27) une augmentation de la sensibilité proportionnelle au facteur 1/λ. Cet effet est bien observé sur les résultats numériques reportés sur la figure 28 lorsque les pertes métalliques sont négligeables (λ_m=1).

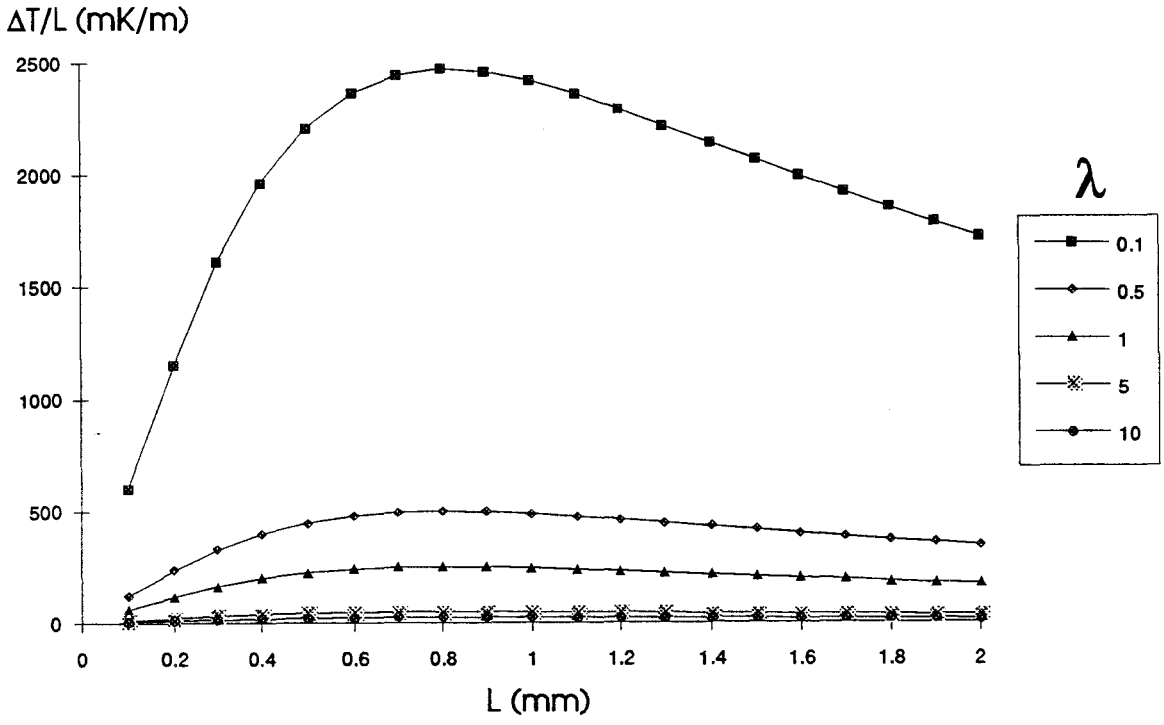


fig 27 - **Résultats analytiques** - Evolution du rapport ΔT/L en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique du substrat λ pour une épaisseur de substrat de 400μm et de la conductivité thermique de surface λ_m=1W/m*K

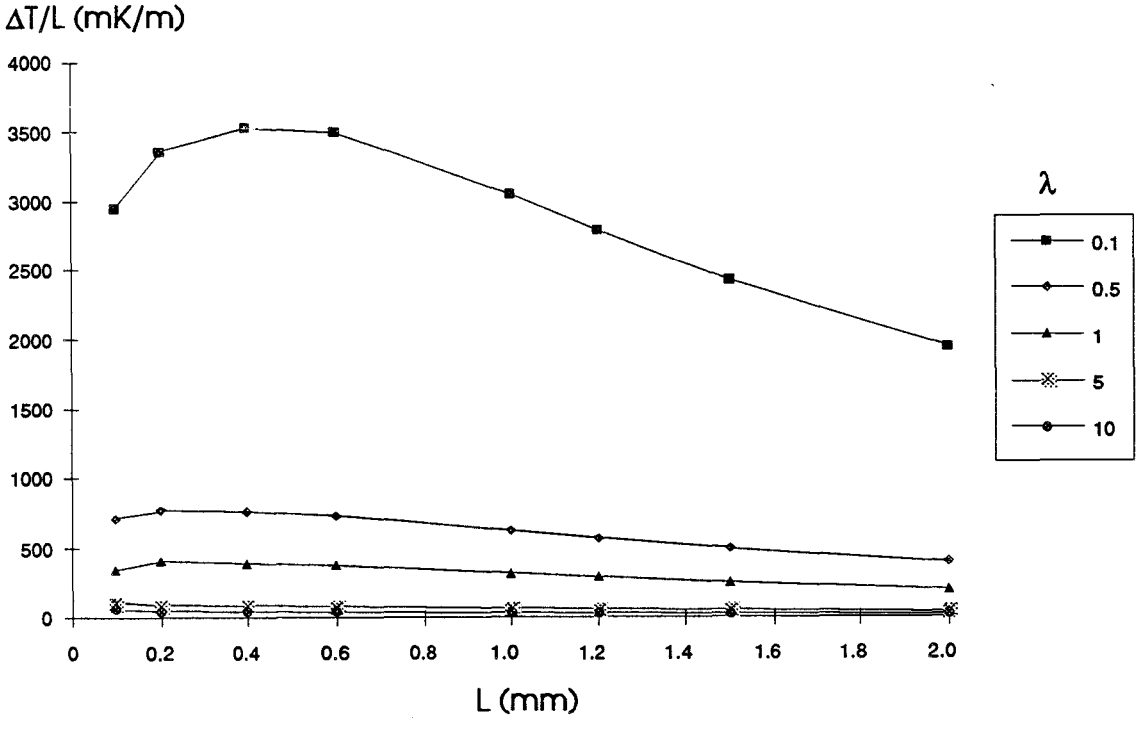


fig 28 - **Résusltats numériques** - Evolution du rapport ΔT/L en fonction de la longueur de demi cellule L et de conductivité thermique du substrat λ pour une épaisseur de substrat de 400μm et conductivité thermique de surface λ_m=1W/m*K

Lorsqu'il n'en est pas ainsi (λ_m=40), comme le prévoit les relations analytiques, le rapport $\Delta T/L$ (reporté sur les figures 29 et 30) diminue et ceci d'autant plus (en variation relative) que la conductivité du substrat et la longueur l sont faibles.

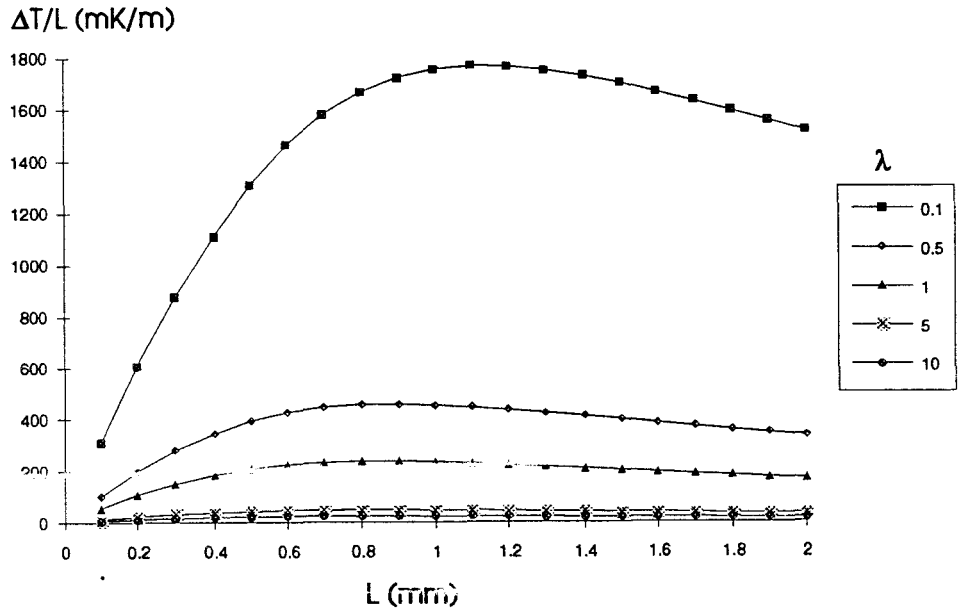


fig 29 - **Résultats analytiques** - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique du substrat λ pour une épaisseur de substrat de 400µm et de la conductivité thermique de surface λ_m=40W/m*K

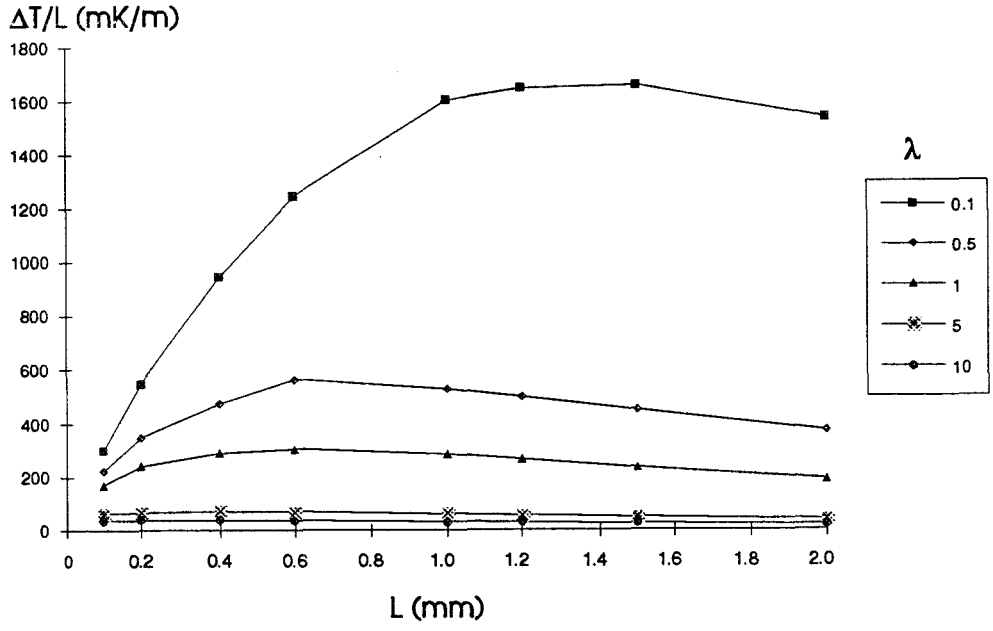


fig 30 - **Résultats numériques** - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique du substrat λ pour une épaisseur de substrat de 400µm et de la conductivité thermique de surface λ_m=40W/m*K

V 24 Influence des phénoménes de convection

Dans la théorie analytique, nous avons montré que les phénomènes de convection devraient trés peu influencer la tension de sortie du capteur (proportionnelle à ΔT). Il est important d'étudier dans quelle mesure cette analyse est vérifiée par nos calculs numériques. Un ensemble de résultats est donné figure 31. L'évolution de ΔT en fonction du coefficient h caractérisant les phénomènes de convection est représenté figure 31. On note que ΔT et donc ΔV ne varient pas de plus de quelques pour-cents entre le cas où la convection est nulle (h=0) et celui où les phénomènes de convection sont maximals pour un environnement gazeux (soit h=200 W/Km²)

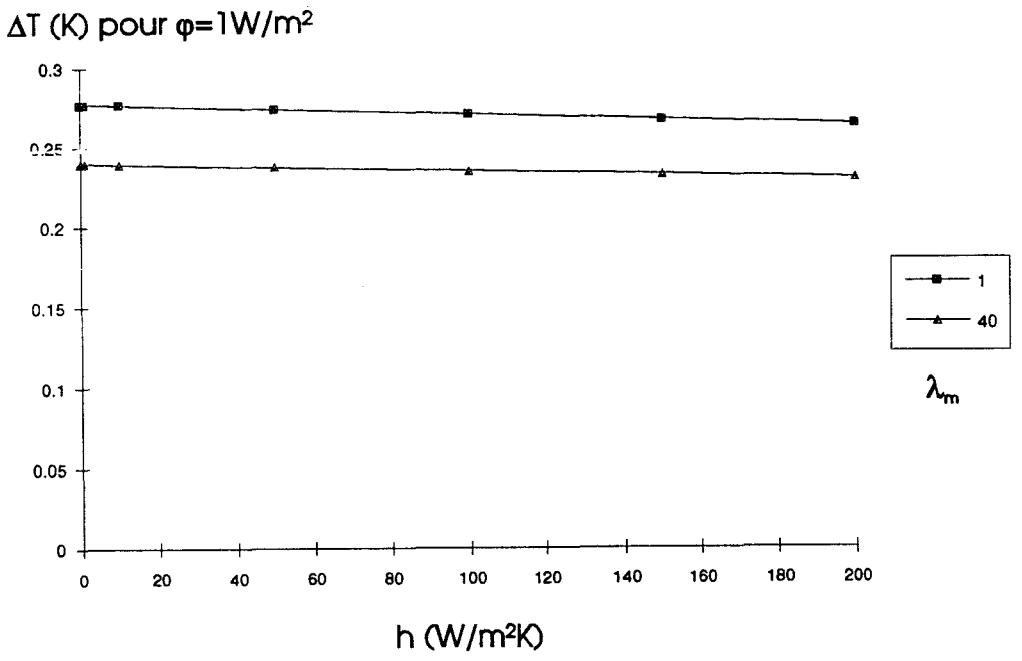


fig 31 - **Résultats numériques** - Evolution de la différence de température entre T_1 et T_2 pour un substrat de verre de 400µm d'épaisseur et une longueur de demi cellule de 800µm

V 3 Conclusion:

En résumé la plupart des conclusions résultantes de l'étude analytique ont été vérifiées par le calcul numérique à deux dimensions. De ce fait, les relations obtenues analytiquement

dans ce chapitre constituent un guide précieux pour la conception de capteurs thermoélectriques. Néanmoins, au niveau quantitatif des écarts relativement importants peuvent exister dans certains cas entre ceux obtenus analytiquement et numériquement. C'est pourquoi dans la suite de ce travail, nous utiliserons le plus souvent les résultats obtenus sur ordinateur.

VI Premier essai de vérification expérimentale des études et des simulations effectuées sur un capteur à couche épaisse

Utilisant les idées du Professeur Thery, MM Gaviot, D Leclercq, S Guths et B Verbeke ont réalisés les premières structures expérimentales à partir de feuilles de kapton métallisées. Il paraît donc intéressant de comparer les resultats obtenus à ceux correspondants aux prévisions théoriques établies dans ce chapitre.

VI 1 Le procédé de fabrication de capteur USTL à partir de feuilles de kapton.

Le procédé utilisé consiste à assembler par collage de deux feuilles de kapton sur lesquelles ont été superposés les différents métaux constituant les thermopiles et les parties métalliques réfléchissant le rayonnement infrarouge.

L'élément de départ est constitué (fig 32a) par une feuille de kapton de 80μm d'épaisseur sur laquelle à été déposée par collage une feuille de constantan de 5μm d'épaisseur, le tout étant recouvert d'une couche de cuivre d'épaisseur 2μm déposée par électrolyse.

On réalise alors (fig 32b) après masquage par gravure au perchlorure de fer, non seulement le cuivre mais aussi le constantan, le serpentin qui va constituer la piste de largeur l sur lesquels seront constitués et assemblés en série les thermopiles élémentaires (notons d'une part que la distance séparant deux éléments parallèles adjacents de la piste sera notée i et appelée l'interpiste, notons d'autre part que sur un élément de piste seront réalisées un très grand

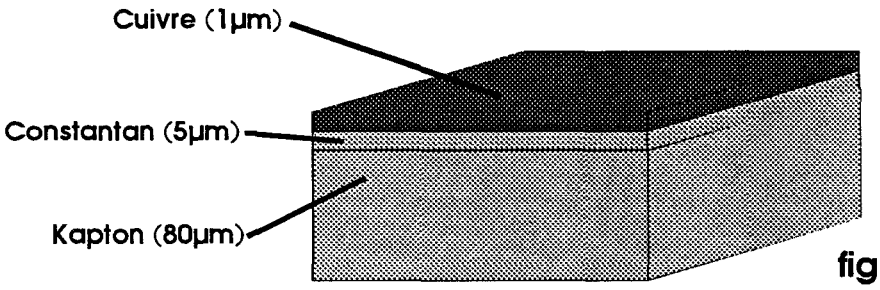


fig 32a

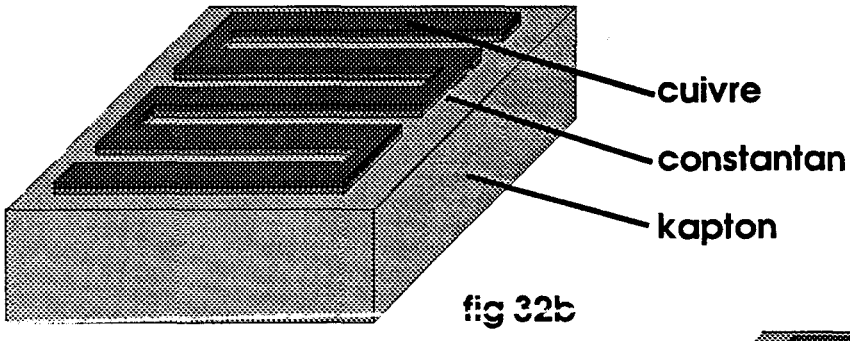


fig 32b

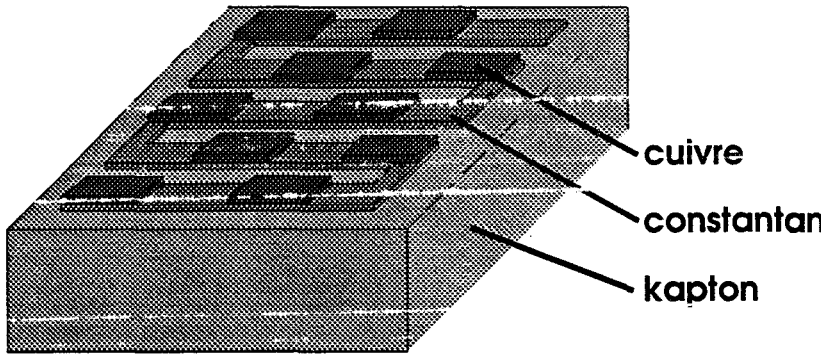


fig 32c

fig 32d

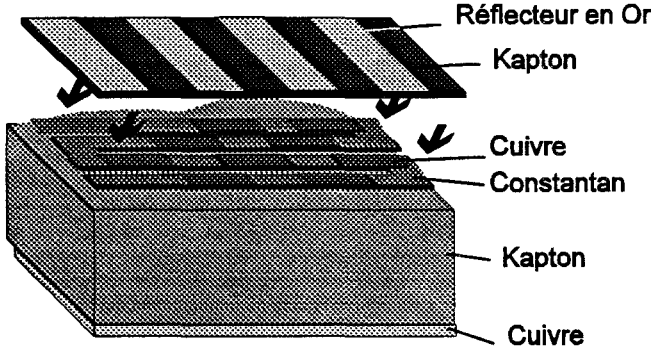


fig 32e

Réalisation des capteurs sur Kapton

nombre de thermopiles contrairement à ce qui est représentée, pour des raisons évidentes de simplicité, sur la figure 32c.

Un deuxième masquage et une attaque chimique sélective au peroxodisulfate d'ammonium permet alors de dégager (fig 32c) les plots de cuivre de longueur L constituant l'une des deux parties de la thermopile (l'autre étant constitué par la partie de constantan non recouverte par le cuivre).

Il reste alors à réaliser les parties réfléchissant le rayonnement infrarouge recouvrant les jonctions qui seront ainsi maintenues « froides ». Dans ce but on utilise une deuxième feuille de kapton d'épaisseur beaucoup plus faible (14µm) recouverte d'une couche métallisée constituée de titane (d'épaisseur 100Å) et d'or (d'épaisseur 2000Å) déposée par évaporation. Cette couche métallique est après masquage attaquée à l'eau régale afin de constituer comme le montre la figure 32d, les zones réfléchissantes et celles qui laisseront passer le rayonnement infrarouge, ces deux zones sont généralement de même longueur L.

La structure finale est alors constituée en assemblant après alignement et par collage sous presse à l'araldite les deux feuilles comme le montre la figure 32e.

VI 2 Résultats expérimentaux et comparaisons avec la théorie développée dans ce chapitre.

Deux séries de capteurs caractérisées par des largeurs de piste différentes et dont les caractéristiques sont rassemblées dans le tableau I 1 ont été réalisées en utilisant le procédé que nous venons de décrire. Ils ont été ensuite caractérisés expérimentalement par M Verbeke en utilisant un corps noir de référence placée dans des conditions d'influence totale au voisinage du capteur en utilisant des procédés décrits largement en [58]. Le tableau I 2 résume les résultats obtenus. La grandeur déterminée expérimentalement est la sensibilité en flux:

$$S\varphi = dV/d\varphi \qquad \text{(I-58)}$$

où dV représente la variation de la tension à la sortie du capteur lorsque le flux infrarouge auquel il est soumis varie de $d\varphi$.

	A (mm^2)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	n	e_{Cu} (µm)	e_{Cn} (µm)	épaisseur substrat (µm)
série 1	100	65	65	1000	384	1	5	80
série 2	100	100	100	1000	250	1	5	80

tableau I 1 - Caractéristiques géométriques

Connaissant $S\varphi$, on peut déduire facilement S_V et S_T à partir des relations suivantes:

$$S_T = 4\,\sigma\,T_O^3\,S\varphi \qquad \text{(I-59)}$$

$$S_V = \frac{S\varphi}{A} \qquad \text{(I-60)}$$

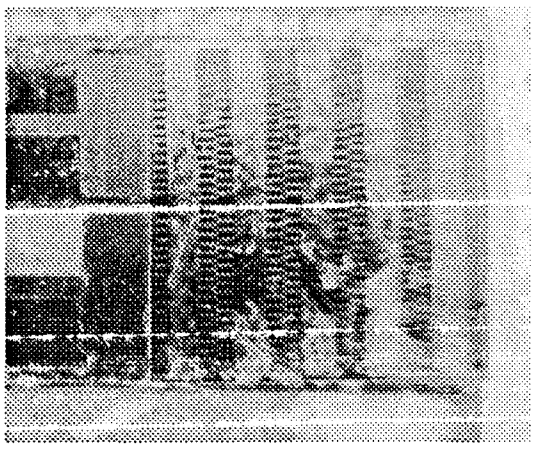
Les valeurs de S_V et S_T sont données dans le tableau I 2 ainsi que les résistances électriques présentées par les deux séries de capteurs. On note que comme on pouvait le prévoir que la résistance électrique présentée par le capteur caractérisée par une piste de largeur la plus faible est la plus élevée. Par ailleurs, comme le laissait prévoir la théorie analytique et numérique, les sensibilités obtenues sont sensiblement dans le rapport inverse de la largeur de piste l.

	$S\varphi$ (µV/W/m^2)	S_V (V/W)	S_T (µV/K)	Re (Ω)
série 1	4	0.04	22.82	950
série 2	3	0.03	17.11	450

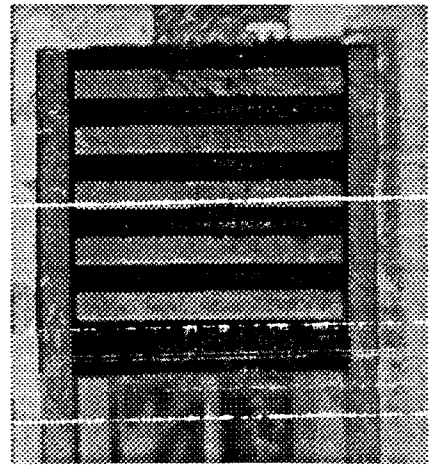
tableau I 2 - Performances expérimentales

Bien entendu, une comparaison plus quantitative peut être effectuée en utilisant les simulations numériques. Dans le calcul, nous avons admis que les surfaces du capteur non recouvertes de métallisation étaient en tout point non réfléchissantes et parfaitement absorbantes, c'est à dire d'émissivité égale à 1 et les résultats obtenus sont donnés tableau I 3.

On remarque que si les résistances électriques mesurées sont assez proches de celles prévues théoriquement, les sensibilités théoriques sont sensiblement supérieures à celles déterminées expérimentalement. Cet écart entre valeur théorique et expérimentale peut sans doute s'expliquer par une absorption insuffisante de la surface du capteur recevant le rayonnement infrarouge et de ce fait par un coefficient d'émissivité sensiblement inférieur à 1. Quelques essais effectués en utilisant du kapton « noir » plus absorbant (fig 33) ont en effet montré que la sensibilité pouvait être sensiblement augmentée [58]. Une analyse plus quantitative peut



a



b

fig 33 - Photos de réalisation de capteur en kapton
standard (a) et kapton noir (b)

d'ailleurs être effectuée. En effet, à partir des valeurs obtenues tant théoriquement qu'expérimentalement, l'émissivité moyenne ε_M présentée par l'ensemble de la surface du capteur peuvent être obtenue, on a:

$$\varepsilon_T = \frac{S_{\varphi\ \text{Expé rimental}}}{S_{\varphi\ \text{thé orique}}}$$

Les valeurs déterminées à partir de cette relation sont données dans le tableau I 3 et l'on remarque que « l'émissivité observée expérimentalement » est nettement plus faible que celle prévue en tenant simplement compte de la perte d'énergie infra rouge résultant de la réflexion air-kapton à la surface du capteur (ε # 0.97). Cet écart peut s'expliquer en considérant la

	Sφ (μV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (μV/K)	ε_T	Re (Ω)
série 1	5.56	0.055	31.37	0.72	665
série 2	3.56	0.036	20.28	0.84	315

tableau I 3 - Performances prévues par simulation numérique en admettant une absorption complète sur toute la surface (ε =1) et les valeurs d'émissivité obtenues par comparaison avec les valeurs des sensibilités expérimentales

structure constituant la surface absorbante. Il apparaît que la partie située au dessus des métallisations est constituée par une épaisseur de kapton de seulement 14μm d'épaisseur ce qui est sans doute insuffisant pour absorber complètement le rayonnement infrarouge. Dans le cas limite où l'on admet que ces parties ne recueillent pratiquement pas d'énergie infrarouge et qu'au contraire les parties situées sur une épaisseur de kapton beaucoup plus importante (80+14μm) l'absorbe complètement, l'émissivité moyenne de l'ensemble de la surface absorbante est alors:

$$\varepsilon = \frac{i}{i+l} = 0.5$$

Cette valeur est inférieure aux « émissivités expérimentales » et un calcul simple montre que l'émissivité des parties des surfaces comportant des métallisations est de l'ordre de 60% ou un peu inférieure, ce qui semble raisonnable compte tenu des propriétés d'absorption infra rouge du kapton.

Connaissant les valeurs expérimentales d'une part de la sensibilité en température S_T et d'autre part de la résistance électrique Re des deux séries de capteur réalisées, on peut en déduire à partir de la relation (I 43) la précision ultime (résultant du bruit thermique engendré dans la résistance du capteur) que l'on pourrait obtenir avec les capteurs réalisés à partir de la relation:

$$dT_{\min} = \frac{\sqrt{4\,k\,T\,\mathrm{Re}\,\Delta f}}{S_T} \quad \text{(avec } \Delta f = 100\text{Hz)} \qquad \text{(I-61)}$$

Les résultats obtenus à partir de cette relation et des valeurs expérimentales de S_T et Re sont donnés dans le tableau I 4 et comparés à celles obtenus à partir de la formule analytique (I 49). Si l'on peut noter que les valeurs « expérimentales » et les valeurs théoriques sont tout à fait du même ordre de grandeur, il faut surtout souligner que l'imprécision ultime affectant la détermination de la température est très faible de l'ordre du millième de degré et très largement inférieure à celle nécessaire dans de nombreuses utilisations.

	ΔT_{min} (mK) « expérimental »	ΔT_{min} (mK) « Relation I 49 »
série 1	1.48	1.886
série 2	1.60	1.886

tableau I 4 - Performances prévues expérimentales et analytiques de la précision ultime

VII Conclusion

En résumé, il apparaît que les résultats obtenus expérimentalement avec les premiers prototypes de capteurs USTL sont tout à fait encourageants. Malgré la diminution de sensibilité liée à l'utilisation d'une structure symétrique réduisant et même annulant les effets de convection et de conduction, l'imprécision minimale en température reste très faible. Le champ d'application potentiel du nouveau type de capteur que nous avons présenté dans ce chapitre est donc très étendu.

Par ailleurs les comparaisons entre la théorie et l'expérience effectuées en **VI** sont dans l'ensemble satisfaisantes. Le bon accord obtenu montre que les analyses présentées et les procédés de simulations numériques utilisés tout au long de ce chapitre peuvent constituer un guide précieux pour concevoir avec des technologies encore mieux adaptées (couches minces) des capteurs encore plus performants. C'est donc ce que nous nous proposons de faire dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Premières réalisations de capteurs thermiques en couche mince

Caractérisation expérimentale et comparaison avec la théorie

Chapitre II

Premières réalisations de capteurs thermiques en couche mince. Caractérisation expérimentale et comparaison avec la théorie.

I Introduction

L'étude effectuée dans le premier chapitre nous a permis de vérifier qu'il était possible de réaliser un nouveau type de capteur insensible aux phénomènes de conduction et de convection, permettant, de ce fait de mesurer de façon fiable, sans contact et dans un environnement quelconque la température d'un objet.

Néanmoins, les réalisations effectuées sur couches épaisses à partir de substrat de kapton présentent un certain nombre d'inconvénients:

- les dimensions ultimes réalisables au niveau des largeurs l des pistes thermoélectriques et de i leurs espacements sont supérieures à quelques dizaines de microns. C'est ainsi que, compte tenu du fait que S_T et S_V sont proportionnelles à l/(l+i) (relation I-59), les sensibilités des capteurs utilisés ne peuvent être très importantes.

- le substrat utilisé (le kapton) ne peut supporter sans dommage des températures supérieures à 250°C et ceci limite le spectre d'application des capteurs réalisés. Par ailleurs le kapton utilisé est poreux et cette caractéristique impose, chaque fois qu'un traitement humide chimique est effectué, de longues opérations de rinçage.

- compte tenu de la technologie employée (couche épaisse), les épaisseurs de métallisations utilisables sont généralement supérieures au micron; en conséquence, les phénomènes de conduction thermique dans les métallisations ne peuvent être réduits: une diminution importante de la sensibilité tant en tension qu'en température peut en résulter.

- enfin, les procédés utilisés (par exemple la superposition de deux feuilles de kapton) nécessite des opérations manuelles délicates d'ajustement pouvant conduire à des prix de

fabrication importants et l'élaboration collective en un seul ensemble d'opérations d'un très grand nombre de capteurs est difficilement envisageable.

L'utilisation de technologies plus proches de celle utilisée en micro-électronique devrait permettre de remédier à tous ces inconvénients et nous proposons d'étudier dans ce chapitre leur mise en oeuvre.

II Choix des matériaux utilisés pour la réalisation du capteur.

Le choix des différents matériaux doit être effectué en tenant compte des deux objectifs suivants:

- faciliter les opérations technologiques de fabrication de la structure.

- utiliser, en se basant sur les résultats obtenus dans le premier chapitre, des matériaux ayant des caractéristiques optiques (IR), thermiques et électriques conduisant aux performances les plus élevées.

Le choix le plus important et sans doute le plus difficile concerne le substrat de base sur lequel sera réalisé le capteur. Compte tenu des résultats obtenus en I, il doit être le plus isolant possible au niveau thermique et ceci élimine (sauf, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, en utilisant des structures plus complexes à base de membrane, de ponts ou de poutres) tous les substrats semi conducteurs tel que le Si ou le GaAs. Il doit par ailleurs résister aux températures les plus élevées possibles. Il doit enfin présenter une surface suffisamment plane et de bonne qualité pour permettre le déroulement des différentes opérations technologiques.

Un bon compromis (si on se limite aux matériaux les plus usuels) consiste à utiliser des lamelles de verre. Certes, la valeur de la conductivité thermique λ est relativement élevée (environ dix fois supérieure à celle du kapton) mais en contre partie le verre résiste à des températures pouvant atteindre 1000°C, sa surface est bien plane, dure et compacte. Par

ailleurs, il n'est pas poreux et résiste bien aux acides et aux bases et il est biologiquement compatible. C'est donc, dans une première étape, ce type de substrat que nous retiendrons.

Il fallait alors retenir les deux métaux de base de la thermopile. L'or étant l'un des métaux le plus couramment utilisé et maîtrisé en micro-électronique s'imposait et nous avons choisi le constantan afin d'obtenir un coefficient Seebeck suffisamment important.

Un diélectrique devait ensuite être choisi pour absorber le rayonnement infrarouge, isoler électriquement les thermopiles des « miroirs réfléchissants » l'infrarouge et nous avons choisi le nitrure de silicium dont le dépôt par exposition aux plasmas est aujourd'hui très bien maîtrisé.

C'est donc avec ces différents matériaux que nous avons mis au point les différents procédés de fabrication de capteur USTL que nous allons maintenant décrire.

III Procédés de fabrication du capteur USTL à partir d'une technologie « couche mince »

Les différentes étapes de fabrication que nous avons mis au point sont décrites dans la figure 34 et nous nous proposons de les passer en revue en insistant plus particulièrement sur les aspects qui ont nécessité des études plus particulières.

1°) Nettoyage du substrat de départ:

Il se fait avec de l'acétone et de l'alcool; il est suivi d'un séchage à l'azote (fig 34a).

2°) Dépôt d'une couche uniforme de constantan (fig 34b):

Afin d'obtenir une bonne adhérence, la plaque de verre subit tout d'abord un « etching à l'argon ». Différents essais ont alors été effectués pour obtenir les meilleurs procédés et conditions de dépôt. La pulvérisation par magnétron permet d'obtenir des vitesses de dépôt

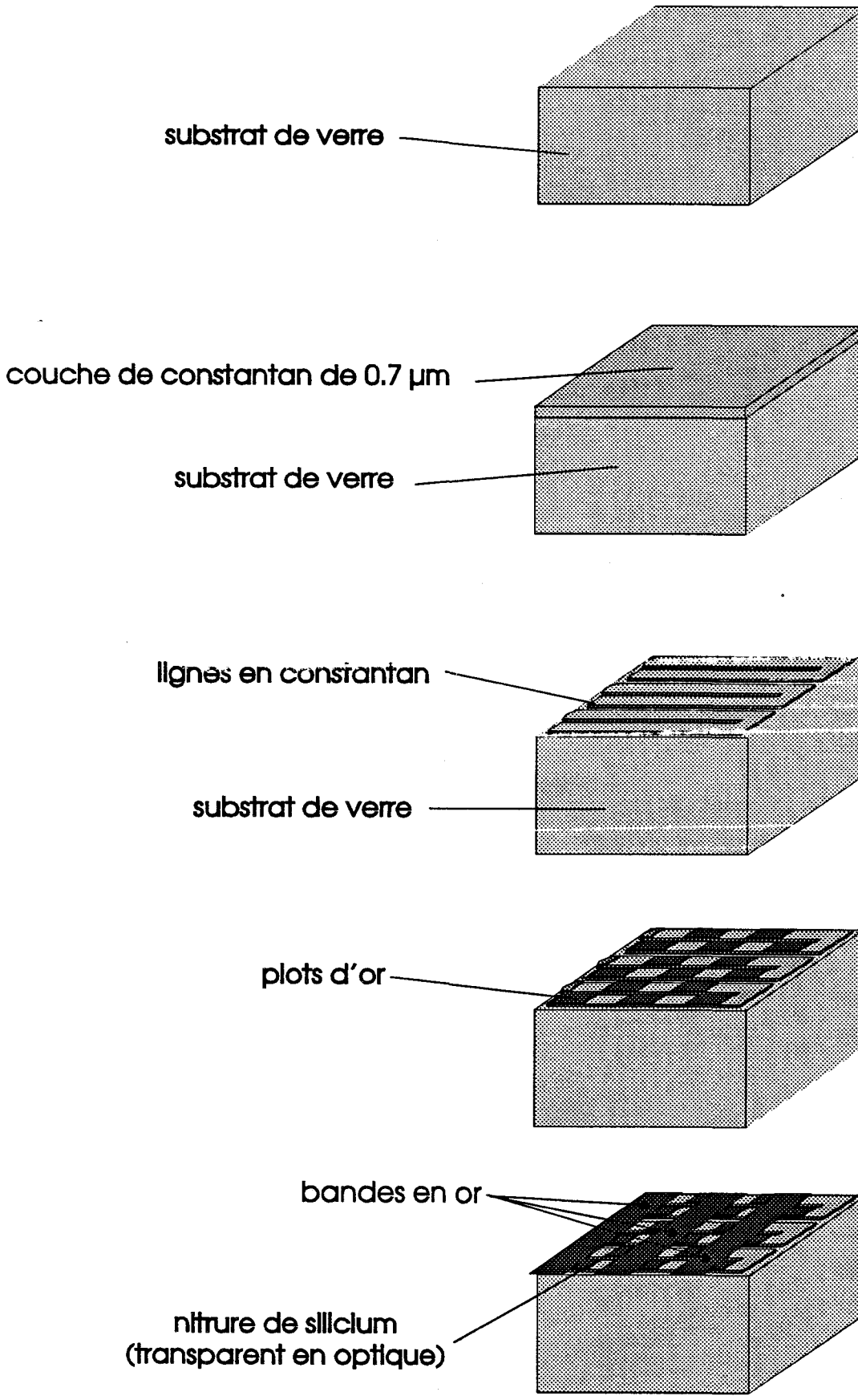


fig 34a

fig 34b

fig 34c

fig 34d

fig 34e

Réalisation des capteurs sur verre

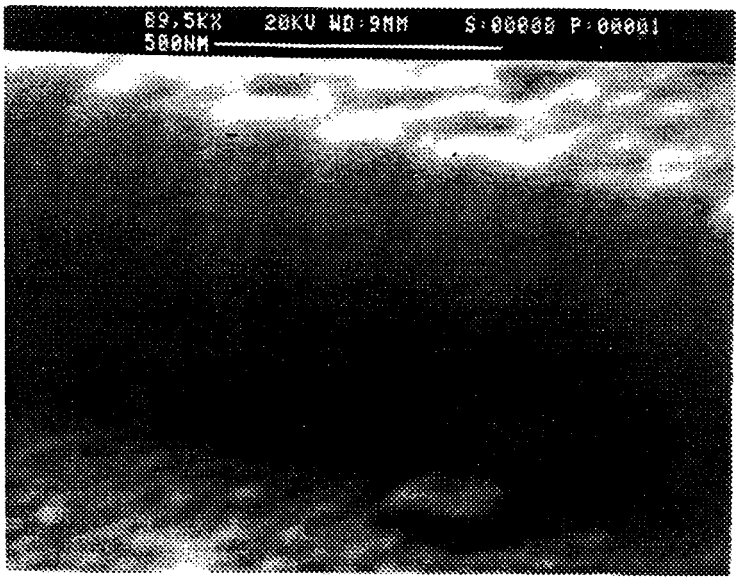


fig 35a - Constantan non recuit

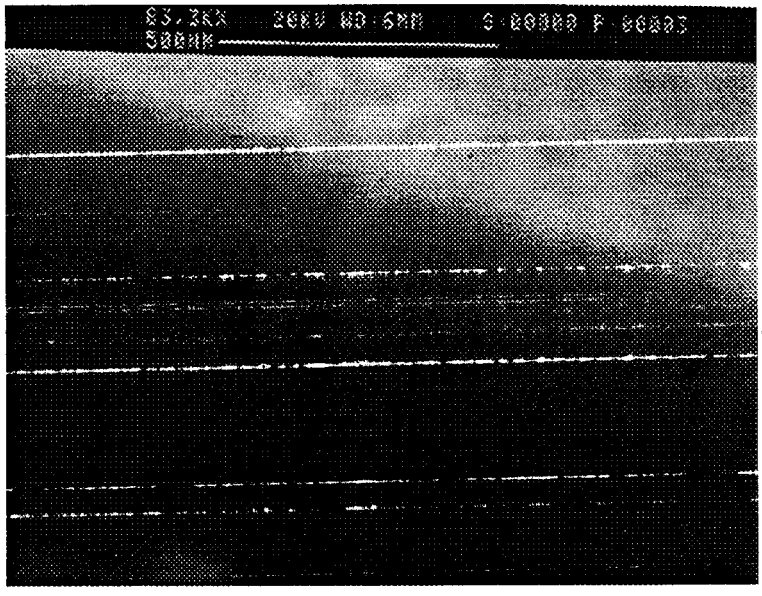


fig 35b - Constantan recuit

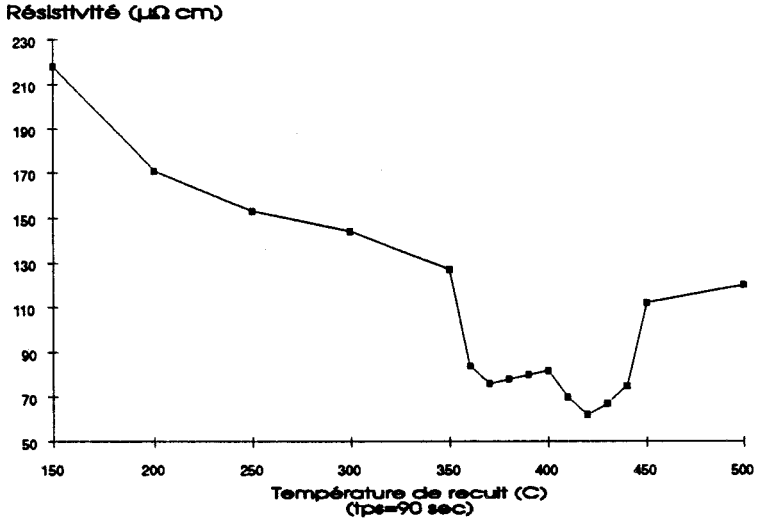


fig 36 - Evolution de la résistivité du constantan en fonction de la température de recuit

de constantan satisfaisante (600 Å/min) dans les conditions « optimales » suivantes: pression d'argon 1mbar, puissance 200Watts. Le problème réside cependant dans les caractéristiques de la couche déposée d'épaisseur voisine de 0.7 micron. La qualité cristallographique est mauvaise (fig 35a) et surtout la résistivité est trois fois supérieure à celle existant « en volume ». Dans le but d'améliorer les caractéristiques du dépôt, nous avons procédé à différents essais de recuits rapides. Il apparaît que la qualité de la couche peut être considérablement augmentée tant au niveau cristallographique (fig 35b) qu'au niveau résistivité électrique. Nous avons représenté sur la figure 36, l'évolution de la résistivité en fonction de la température de recuit pour une durée de 90 secondes. On note qu'une valeur de température de 420°C semble optimale et c'est donc celle que nous avons adoptée.

3°) Réalisation des pistes de constantan:

Celles ci pouvaient en principe être réalisées directement par « lift off » mais les premiers essais effectués dans ce sens ont montré que ce type de lithographie n'était pas adapté aux conditions de dépôt du constantan par pulvérisation. Des phénomènes de cuisson parasite de la résine liés aux bombardements métalliques se produisent, et rendent celle ci imperméable aux solvants. Il nous a donc fallu renoncer à ce procédé et choisir une technique de gravure.

Sur le dépôt de constantan réalisé dans les conditions décrits au 2°), une résine optique (AZ 1400-27) est appliquée et un masquage optique permet alors de définir les zones protégées qui permettront de définir la piste de constantan. L'immersion de la plaquette dans un bain d'acide sulfurique permet alors d'attaquer les parties non protégées de constantan et de graver les lignes de constantan représentées sur la figure 34c.

4°) Réalisation des plots d'or (fig 34d)

Il faut alors procéder au dépôt des plots d'or constituant le deuxième élément des thermopiles. Le dépôt de ce type de métal pouvant être réalisé par évaporation, on utilise ici une technique

de « lift off » et une lithographie de type optique classique. Pour des largeurs de quelques microns, la définition et la qualité (absence de lichettes) sont tout à fait satisfaisantes

5°) Dépôt de la couche diélectrique (fig 34e):

Elle est constituée d'une épaisseur de l'ordre du micron de nitrure de silicium déposée par dépôt plasma. Celle ci est déposée en deux fois afin de minimiser les problèmes de pores qui se forme en début de dépôt.

6°) Dépôt des bandes métalliques réfléchissant le rayonnement infrarouge (fig 34e):

Ces bandes déposées sur le nitrure au dessus de l'ensemble des jonctions froides comme le montre la figure 34e, sont constituées par dépôt d'Au (100 Å de Ti et 2000 Å d'Au) et réalisées par la technique de « lift off » et en utilisant une lithographie classique optique.

7°) Gravure du diélectrique:

Celle ci est nécessaire pour dégager les plots d'accès. Elle est faite classiquement en utilisant une gravure ionique réactive.

IV Caractérisation des premiers capteurs réalisés à partir de ces procédés. Interprétation des résultats obtenus et l'étude de l'influence des dimensions géométriques des éléments thermoélectriques

La photographie figure 41 montre un exemple de capteur thermoélectrique réalisé à partir des procédés que nous venons de décrire. Les dimensions géométriques et les épaisseurs des différentes métallisations réalisées et des isolants thermiques utilisés pour les premiers prototypes sont données dans le tableau II 1.

	A (mm^2)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	n	e_{Cn}(µm)	e_{Au}(µm)	e_V(mm)
verre 1	9	20	10	150	960	0.7	0.2	1
verre 2	9	20	10	300	500	0.7	0.2	1
verre 3	9	20-5	17.5	300	500	0.7	0.2	1

Tableau III - Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques des capteurs ainsi réalisés ont été déterminées en suivant les procédés classiques utilisés dans l'étude des capteurs couches épaisses réalisés sur feuille de kapton. Un exemple de résultats obtenus en plaçant comme l'indique le figure 37 le capteur dans une situation « d'influence totale » devant un corps noir de température variable est reporté sur la figure 38. La tension aux bornes du capteur est reportée en fonction de la densité de flux total φ_T auquel est soumis le capteur et que l'on peut calculer (en utilisant la relation I 6) connaissant la température T_n du corps noir et T_0 du capteur par la relation (obtenue en supposant k#1 et f(ε)#1):

$$\varphi_T = \sigma(T_n^4 - T_0^4)$$

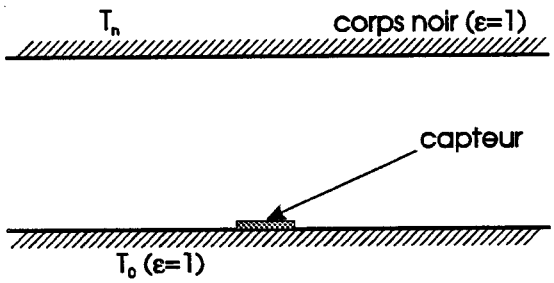


fig 37 - Configuration expérimentale utilisée pour mesurer la sensibilité du capteur

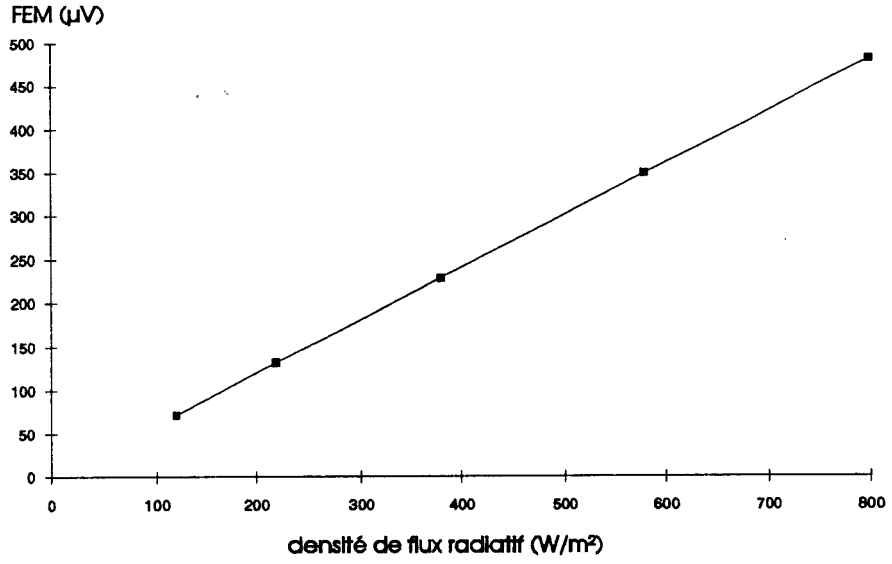


fig 38 - Evolution de la FEM aux bornes du capteur en fonction de la densité de flux incident

A partir des données expérimentales représentées sur la figure 38, il est facile de déduire les valeurs de S_φ puis à partir des relations I59 et I60 d'en déduire S_V et S_T.

Les résultats obtenus pour les deux premiers capteurs (type 1 et 2) sont donnés dans le tableau II2 où apparaissent également les valeurs obtenues expérimentalement pour la résistance électrique totale Re présentée par le capteur. Dans ce tableau, nous avons aussi reporté les valeurs obtenues théoriquement à partir du procédé de simulation numérique décrit dans le chapitre I. On constate que les valeurs des résistances électriques prévues par le calcul sont comparables mais légèrement inférieures à celles obtenues expérimentalement: ce fait peut s'expliquer en tenant compte du fait que les valeurs des conductivités obtenues en couches minces sont un peu plus faibles que les valeurs correspondantes aux conducteurs en volume que nous avons utilisés dans les calculs.

		S_φ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/°K)	Re (Ω)
verre 1	Expérimental	0.48	0.053	2.72	7260
	Numérique	1	0.111	5.695	6139
verre 2	Expérimental	0.6	0.066	3.38	7100
	Numérique	1.285	0.1425	7.315	6395

Tableau II2 - Comparaison des valeurs expérimentales et numériques pour une absorption sur toute la surface de réception (η=1)

Comparons maintenant les résultats obtenus et reportés dans le tableau II2 aux niveaux des sensibilités, l'influence de la longueur L de la demi cellule du capteur élémentaire peut tout d'abord être étudiée. Lorsque l'on passe d'une valeur pour L de 150µm à 300µm, la théorie prévoit une augmentation de la sensibilité du capteur de 28% et l'expérience nous donne une valeur de 24%, ce qui peut être considéré comme satisfaisant. Par contre il apparaît clairement que les valeurs caractérisant la sensibilité du capteur définie aussi bien par S_φ, S_V ou S_T sont plus faibles que les valeurs prévues théoriquement. Il faut cependant noter que les calculs sont effectués en admettant que les surfaces non métallisées du capteur ne réfléchissent pas et absorbent uniformément et complètement le rayonnement infrarouge incident et sont, de ce fait, caractérisées par un coefficient d'émissivité égale à 1. En réalité cette hypothèse est loin d'être vérifiée. En effet la surface captant les radiations peut être décomposée en deux parties:

- la première correspondant à la piste thermoélectrique, occupe un pourcentage que nous noterons x_1 et est constituée d'une couche de nitrure (ici d'un micron d'épaisseur) déposé sur une couche métallique qui réfléchit complètement les radiations. De ce fait son émissivité que nous noterons ε_1 devrait être assez faibles.

- la seconde correspondant aux interpistes occupe un pourcentage $1-x_1$ et est constituée d'une couche de nitrure déposée directement sur une lamelle de verre d'épaisseur importante (1mm) qui absorbe complètement les radiations. Le relevé du spectre de transmission infrarouge d'une lamelle de 1 mm d'épaisseur représentée sur la figure 39 montre en effet que, dans tout le domaine spectral correspondant au maximum du rayonnement thermique (5 à 30µm aux températures proches de l'ambiante) le coefficient de transmission est complètement négligeable. L'émissivité de cette seconde partie de la surface que nous noterons ε_2 doit donc être proche de l'unité.

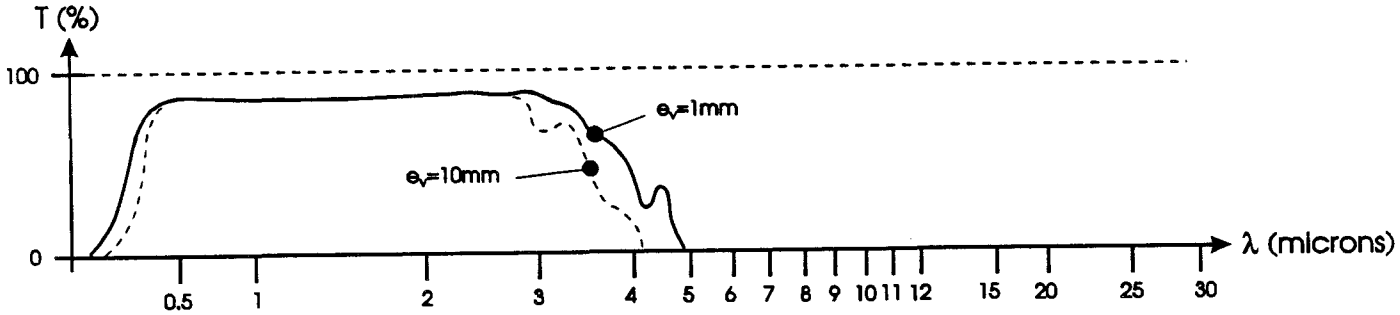


fig 39 - Spectre de transmission de l'infrarouge à travers un verre de 1mm d'épaisseur [59]

Une analyse plus quantitative peut être faite à partir des valeurs expérimentales et théoriques (obtenues en admettant ε=1) de la sensibilité des deux types de capteur.

L'émissivité moyenne de la surface captant les radiations obéit à la double relation suivante:

$$\varepsilon_T = (1 - x_1)\,\varepsilon_2 + x_1\varepsilon_1 = \frac{S_{\varphi\ \text{expérimental}}}{S_{\varphi\ \text{théorique}}} \qquad \text{(II-1)}$$

dans cette relation x_1 est connu et égal à:

$$x_1 = \frac{1+i}{1} = 1 - x_2$$

soit pour les deux premiers types de capteurs étudiés x_1=0.33

Les valeurs obtenues pour ε_T à partir des données rassemblées sont reportées tableau II3. Dans la mesure où l'absorption dans le verre est totale, l'émissivité ε_2 ne dépend que du coefficient de réflexion du dioptre air nitrure verre qui est approximativement estimé à 10% et sa valeur probable est donc ε_2#0.9

	$S_{\varphi\ \text{expér}}$	$S_{\varphi\ \text{théorique}}$ (ε=1)	ε_T (relation II-1)	x_1 (%)	x_2 (%)	ε_1 calculée	ε_2 estimée
type 1	0.48	1	0.48	0.666	0.333	0.27	0.9
type 2	0.6	1.285	0.47	0.666	0.333	0.26	0.9

tableau II3 - Différentes émissivités caractérisant la surface du capteur à partir des valeurs obtenues théoriquement et expérimentalement

Connaissant x_1 et $x_2 = 1-x_1$, on peut en déduire à partir de la relation (II-1) la valeur de l'émissivité ε_1 (correspondant à la surface comportant des métallisations). On obtient (tableau II3) pour les 2 types de capteur des valeurs très voisines qui comme nous l'avons prévues sont très faibles et cette constatation montre qu'il devrait être possible par une meilleure géométrie et par de meilleurs absorbants, d'augmenter la sensibilité des capteurs.

Afin de confirmer cette analyse et les résultats obtenus, il nous a donc semblé intéressant de réaliser une troisième série de capteurs en prenant une géométrie plus favorable à l'absorption du rayonnement infrarouge par le verre afin d'augmenter la sensibilité du capteur. Les caractéristiques de la nouvelle structure que nous avons réalisée sont données dans le tableau II 1 et une comparaison entre les géométries utilisées pour les deux types de capteur (type 3 et type 1 et 2) est effectuée dans la figure 40. Afin d'accroître la surface de verre exposée aux rayonnements, la partie de la surface ne comportant pas de métallisations a été augmentée en diminuant la partie de la piste réalisée en Au (5µm au lieu de 20µm)(fig 41).

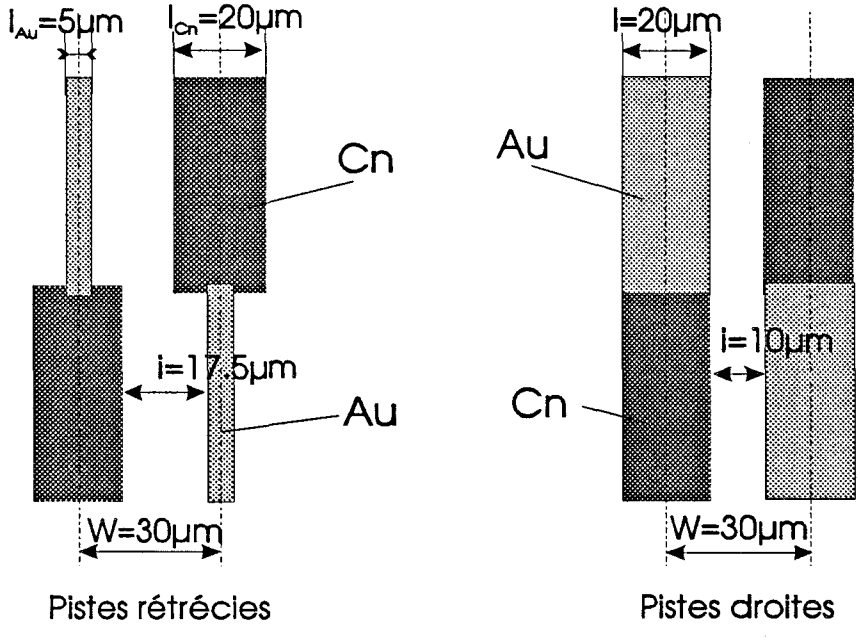
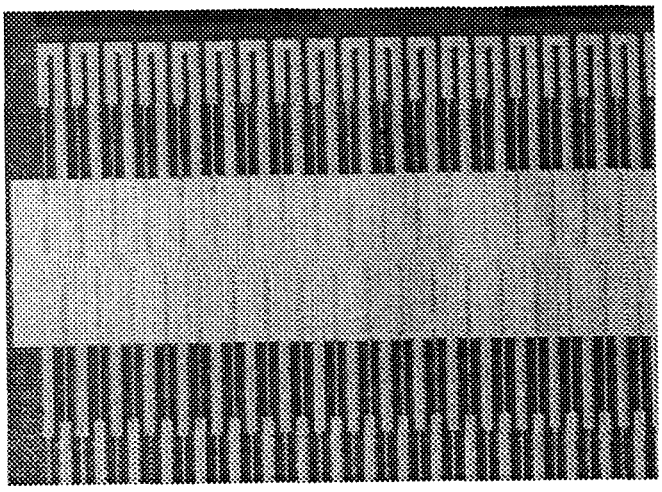
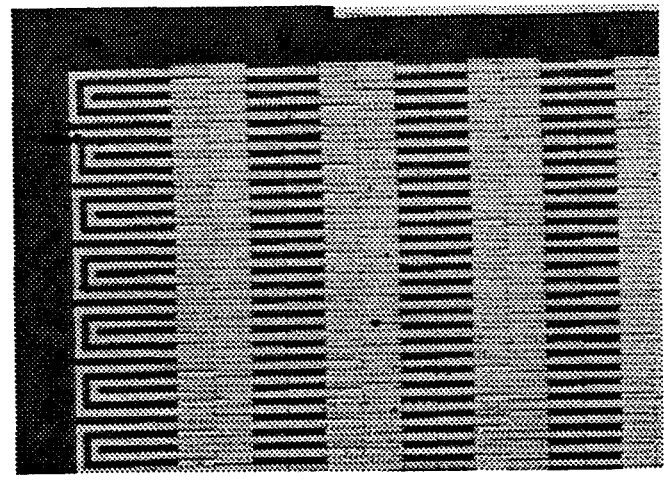


fig 40 - Variation de la conductivité thermique de surface en faisant varier la largeur de piste d'or





piste rétrécie (L=300μm) piste large (L=150μm)

fig 41 - Photos de réalisation en couches minces

Cette diminution doit pouvoir s'effectuer sans trop augmenter la résistance électrique Re de l'ensemble du capteur puisque, compte tenu de la conductivité électrique très élevée de l'or par rapport à celle du constantan, Re est constituée essentiellement par la résistance en Cn. Cette modification est effectuée en gardant l'intervalle W entre milieu de piste (fig 40) constante (et égale ici à 30μm). Un calcul simple permet alors en s'aidant de la figure 40, de déterminer le pourcentage de surface $x_2=1-x_1$ correspondant aux interpistes et qui devrait être caractérisé par une émissivité importante ($\varepsilon_2=0.9$). On obtient ainsi:

$$x_2=(30-2.5-10)/30=0.585$$

Par rapport aux deux premières séries de capteur, l'émissivité globale ε_T de la surface devrait donc être augmentée et les sensibilités du capteur plus importantes.

Les résultats obtenus avec cette nouvelle série sont donnés dans le tableau II4 où l'on constate que l'amélioration des performances prévues est bien réalisée. Comme pour les deux premières séries de capteur, l'émissivité totale de le surface ε_T peut être déterminée en comparant les valeurs expérimentales et théoriques des sensibilités reportées dans le tableau II4. A partir de la

valeur obtenue (0.749 nettement plus élevée que pour les capteurs types 1 et 2), il est possible de nouveau de déterminer l'émissivité ε_2 de la partie de la surface comportant les métallisations. Les valeurs obtenues (tableau II4) sont tout à fait comparables à celles déterminées à partir des deux premières séries de capteur. Ce bon accord montre bien la cohérence de nos interprétations et la justesse des modèles théoriques utilisés pour prévoir les performances de nos capteurs

	$S_{\varphi\ expér}$	$S_{\varphi\ théorique}$ (ε=1)	ε_T (relation II-1)	x_1 (%)	x_2 (%)	ε_1 calculée	ε_2 estimée
type 3	1.12	1.495	0.749	0.415	0.585	0.29	0.9

tableau II4 - Différentes émissivités caractérisant la surface du capteur 3 à partir des valeurs obtenues théoriquement et expérimentalement

V Etude de l'influence de l'épaisseur de substrat et de l'environnement

V1 Etude de l'influence de l'épaisseur de substrat

Afin d'étudier l'influence sur les performances de l'épaisseur du substrat utilisé, nous avons réalisé une quatrième série identique au capteur de la série deux mais avec un substrat d'épaisseur plus faible (0.170 mm au lieu de 1 mm). Les caractéristiques des capteurs étudiés sont données dans le tableau II5. Les performances obtenues sont reportées dans le tableau II6 et comparées aux valeurs calculées en supposant une surface d'émissivité égale à 1. Comme le prévoit la théorie, l'épaisseur du substrat joue assez peu sur les sensibilités et la légère diminution prévue théoriquement lorsque l'on diminue e_V est retrouvée expérimentalement (bien que les écarts observés soient trop faibles pour être sans doute significatifs).

	A (mm²)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	n	e_{Cr}(µm)	e_{Au}(µm)	e_V(mm)
verre 2	9	20	10	300	500	0.7	0.2	1
verre 4	9	20	10	300	500	0.7	0.2	0.17

Tableau II 5 - Caractéristiques géométriques

		S_φ (μV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (μV/°K)	Re (Ω)
verre 2	Expérimental	0.6	0.066	3.38	7100
	Numérique	1.285	0.1425	7.315	6395
verre 4	Expérimental	0.52	0.057	2.919	7050
	Numérique	1.25	0.139	7.118	6372

Tableau II 6 - Comparaison des valeurs expérimentales et numériques pour une absorption sur toute la surface de réception (η=1)

Comme précédemment, on peut tenter de déterminer l'émissivité moyenne ε_T de la surface captant les radiations à partir des valeurs théoriques et expérimentales des sensibilités. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau II7 où nous avons également déterminé en utilisant la relation II1 les valeurs des émissivités ε_1 correspondant respectivement à la partie de la surface comportant une métallisation et à celle ne comportant qu'une couche de nitrure sur le substrat de verre. On note que pour les deux séries de capteurs étudiés, l'émissivité ε_2 déduite à partir de nos calculs théoriques pour la surface comportant des métallisations présente des valeurs très faibles de l'ordre de 0.2; un tel résultat avait déjà été obtenu pour les capteurs de la série 1 et 3. En conséquence, lors de la fabrication de nouvelles séries de capteurs, il faudra utiliser des épaisseurs de nitrure plus importantes afin de mieux absorber le rayonnement infrarouge.

	$S_{\varphi\ expér}$	$S_{\varphi\ théorique}$ (ε=1)	ε_T (relation II-1)	x_1 (%)	x_2 (%)	ε_1 calculée	ε_2 estimée
type 2	0.6	1.285	0.47	0.666	0.333	0.26	0.9
type 4	0.52	1.25	0.42	0.666	0.333	0.18	0.9

tableau II 7 - Différentes émissivités caractérisant la surface du capteur à partir des valeurs obtenues théoriquement et expérimentalement

Afin d'étudier de façon plus complète l'effet d'une variation d'épaisseur de substrat, nous avons placé sous le substrat non métallisé de type 4 (e_V=0.17mm) des lamelles de verre, puis le plan de métallisation conditionnant le puits thermique. Nous avons relevé les variations de $S\varphi$ du capteur en fonction de l'épaisseur totale des lamelles ou substrats de verre séparant les pistes thermoélectriques du puits thermique. Les résultats obtenus sont reportés figure 42, on remarque que la sensibilité augmente légèrement lorsque l'épaisseur de verre augmente. Les résultats obtenus théoriquement sont reportés sur la figure 42 en utilisant une émissivité ε_T égale à la valeur du capteur de type 4 (ε_T =0.42). Comme le montrent les valeurs de $S\varphi$ obtenues théoriquement augmentées avec e_V, on peut remarquer que les valeurs relevées expérimentalement sont sensiblement supérieures aux valeurs théoriques. Cet écart pourrait être lié à l'isolation thermique supplémentaire apportée par les différentes interfaces entre les lames de verre. Nous verrons chapitre III qu'une couche d'isolant entre les lamelles peut modifier sensiblement les performances du capteur.

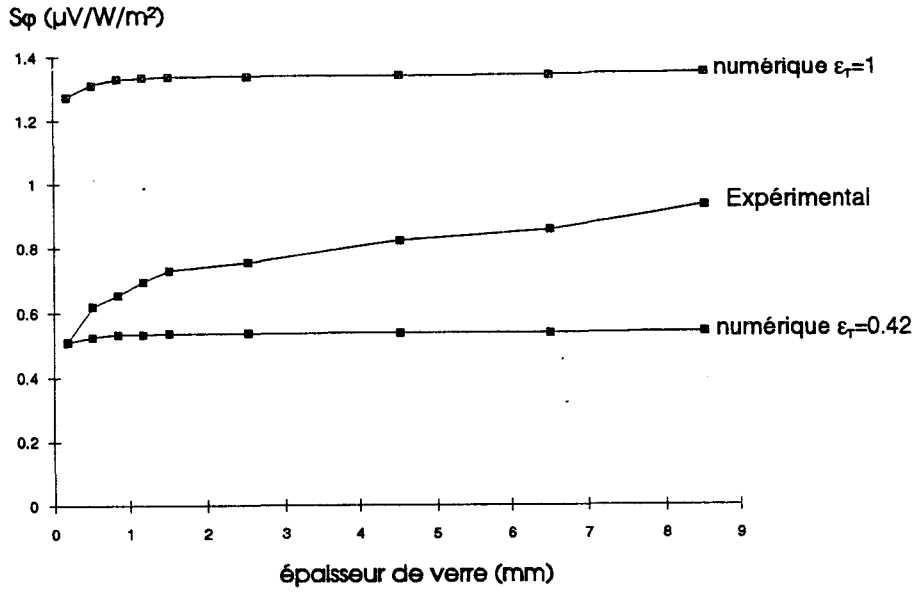


Fig 42 - Evolution de la sensibilité $S\varphi$ en fonction de l'épaisseur de verre - Courbes expérimentale et théoriques

V2 Influence de l'environnement

C'est un point essentiel puisque nous avons vu qu'un des avantages les plus importants du nouveau type de capteur était son « insensibilité » aux phénomènes de conduction et de convection se produisant dans son environnement. Nous avons donc tenté de vérifier cette propriété. Dans ce but, deux types d'expérience ont été effectués; la première a consisté à placer le capteur dans un milieu gazeux de caractéristiques différentes: air, CO_2, He. La variation de la tension thermoélectrique en fonction du flux infrarouge incident arrivant sur la capteur est reportée dans ces trois cas sur la figure 43. On remarque que les sensibilités obtenues sont très voisines. Comme le prévoit la théorie donnée chapitre I, une très légère diminution de la valeur de $S\varphi$ est observée quand on travaille dans le gaz He présentant la conductivité thermique la plus élevée.

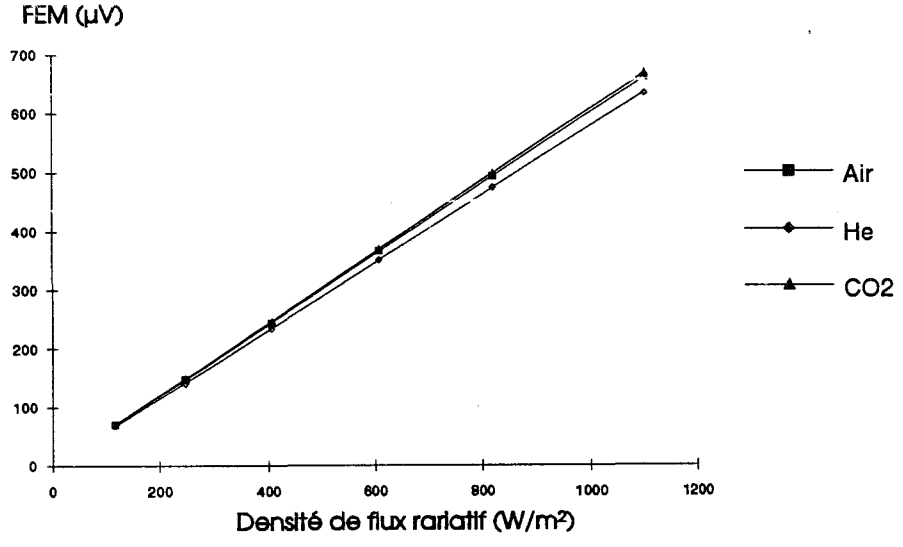


Fig 43 - Evolution de la tension détectée en fonction de la densité de flux radiatif incident et de la nature du gaz environnant

Une autre façon de mettre en évidence l'insensibilité aux éléments extérieurs non radiatifs est d'utiliser une convection forcée en soumettant le capteur à un refroidissement par air pulsé de débit croissant. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure 44, on peut

remarquer qu'aux erreurs expérimentales prés, la valeur de Sφ de dépend pas du débit d'air et ce résultat confirme bien nos prévisions théoriques.

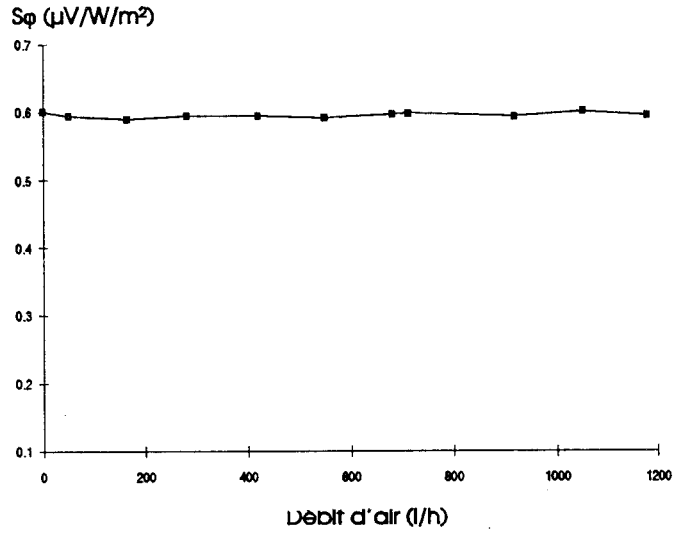


Fig 44 - Evolution de la sensibilité Sφ en fonction du débit d'air

VI Réalisation industrielle du nouveau type de capteur.

Compte tenu des résultats obtenus, compte tenu de l'intérêt et des caractéristiques des nouveaux types de capteurs que nous avons réalisés, il est apparu intéressant de transférer dans l'industrie les résultats que nous avons obtenus.

C'est pourquoi, en étroite collaboration avec la société Captec dirigée par M Théry, le procédé utilisé dans ce travail pour la réalisation des capteurs en couches minces a été repris par la société ICMC.

Compte tenu du matériel et du savoir faire existant dans cette société, un certain nombre de modifications ont été apportées dans la réalisation industrielle du capteur. Le couple thermoélectrique Au Cn a été remplacé par le couple Ni NiCr et la silice (SiO_2) a été substituée au nitrure. Par ailleurs, pour faciliter la lithographie une largeur d'interpiste et de

piste plus importante a été utilisée. Les caractéristiques géométriques du nouveau capteur (verre 5) sont données dans le tableau II 8. Les performances obtenues expérimentalement sont comparées dans le tableau II 9 à celles prévues théoriquement. A partir du rapport entre sensibilité expérimentale et sensibilité théorique, l'émissivité moyenne de la surface captant le rayonnement peut être estimée. Les valeurs relativement élevées obtenues peuvent s'expliquer par le fait que, compte tenu des largeurs d'interpiste utilisées, le pourcentage x_2 correspondant à la partie de la surface non métallisée est plus importante (0.5 au lieu de 0.3) que dans les séries 1, 2 et 4. Comme précédemment, l'émissivité ε_1 de ce type de surface peut être évaluée expérimentalement. La valeur obtenue reportée dans le tableau II10 est relativement élevé (ε_1=0.51) ce qui montre que la silice absorbe dans d'assez large proportion le rayonnement infrarouge.

	A (mm²)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	n	e_{Cn}(µm)	e_{Au}(µm)	e_V(mm)
verre 2	9	20	10	300	500	0.7	0.2	1
verre 5	9	30	30	750	100	0.5	0.5	1

Tableau II 8 - Caractéristiques géométriques

		S_φ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/°K)	Re (Ω)
verre 2	Expérimental	0.6	0.066	3.38	7100
	Numérique	1.285	0.1425	7.315	6395
verre 5	Expérimental	0.64	0.071	3.636	4000
	Numérique	0.905	0.1005	5.147	3850

Tableau II 9 - Comparaison des valeurs expérimentales et numériques pour une absorption sur toute la surface de réception (η=1)

	$S_{\varphi\ expér}$	$S_{\varphi\ théorique}$ (ε=1)	ε_T (relation II-1)	x_1 (%)	x_2 (%)	ε_1 calculée	ε_2 estimée
type 2	0.6	1.285	0.47	0.666	0.333	0.26	0.9
type 4	0.64	0.905	0.707	0.5	0.5	0.514	0.9

tableau II 10 - Différentes émissivités caractérisant la surface du capteur à partir des valeurs obtenues théoriquement et expérimentalement

Chapitre 3

Vers des capteurs thermiques encore plus performants

Chapitre III

Vers des capteurs thermiques encore plus performants

I Introduction

Dans le premier chapitre de ce mémoire, nous avons élaboré un modèle théorique simple d'un nouveau type de capteur thermique thermoélectrique et décrit les procédés de simulation qui pourraient être utilisés pour prévoir exactement les performances susceptibles d'être obtenues. Dans le second chapitre, nous avons procédé à des réalisations technologiques empruntant les procédés de la micro-électronique et les caractérisations expérimentales effectuées sur les prototypes réalisés ont montré la justesse de nos prévisions mais aussi un certain nombre de points qui pouvaient être améliorés.

A la lumière des résultats obtenus dans ces différents domaines, nous nous proposons dans ce dernier chapitre de rechercher dans quelle mesure les performances obtenues pourraient être considérablement augmentées. Ayant cet objectif en mémoire, nous utilisons la théorie analytique et la simulation numérique pour optimiser et modifier les structures précédemment étudiées de façon à en augmenter la sensibilité ou à faciliter leur utilisation. Parallèlement, des essais expérimentaux et quelques réalisations technologiques basées sur l'utilisation d'autres matériaux (polyimide, semi-conducteur) sont effectués pour tenter de confirmer la démarche théorique suivie et commencer à évaluer les problèmes qui pourraient se poser dans les réalisations pratiques.

Dans une première étape, nous partons de la structure étudiée dans le chapitre II comportant un substrat de verre en étudiant comment la sensibilité pourrait être augmentée par la diminution des dimensions, l'augmentation de l'émissivité et la réduction des phénomènes de conduction thermique à travers le substrat vers le puits thermique.

Dans une seconde étape, nous modifions plus radicalement la structure en tentant de supprimer le substrat tout au moins en dessous des zones actives. L'utilisation de matériau semi-conducteur ouvre la possibilité de procéder à des attaques sélectives et c'est donc dans cette direction que nous nous engageons en étudiant les différentes possibilités qui sont offertes tant théoriquement qu'en procédant aux toutes premières réalisations.

II Optimisation de la structure USTL réalisée sur substrat

II 1-Optimisation et modification de la structure sur substrat de verre en vue d'obtenir des sensibilités plus élevées.

Il apparaît que les résultats obtenus dans le chapitre II sur les différents capteurs réalisés à partir de substrat de verre peuvent être sensiblement améliorés et il est donc intéressant d'évaluer comment et de combien les sensibilités peuvent être augmentées.

La façon la plus efficace de procéder est d'utiliser pleinement les possibilités des technologies couches minces de la micro-électronique et de la lithographie optique. On peut aujourd'hui réaliser des motifs de dimensions micrométriques et il semble possible de fabriquer sans trop de difficultés des pistes et des interpistes de largeur l et i de l'ordre du micron. Le tableau III 1 donne les différentes sensibilités qui devraient ainsi pouvoir être obtenues avec un verre de 1 mm d'épaisseur et l'on peut remarquer qu'une augmentation considérable des performances par rapport au « meilleur » capteur réalisé (type 3), peut être espérée.

	α (µV/°C)	e_{Au} (µm)	e_{Cn} (µm)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	$S\varphi$ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/°C)
type 3	40	0.2	0.7	20-5	17.5	300	1.12	0.124	6.36
Optimisation	40	0.1	0.35	1	1	1000	16.176	1.795	92

Tableau III 1 - Comparaison entre le capteur de type 3 et les calculs optimisés des différentes sensibilités pour un capteur sur verre de 1mm d'épaisseur et une surface de 9mm²

Une analyse plus fine est cependant nécessaire pour préciser les conditions qu'il faut réunir pour obtenir effectivement ces performances. Le calcul dont les résultats apparaissent dans le tableau III 1 est en effet effectué en admettant une émissivité de 1 d'une part et d'autre part un coefficient de conduction superficielle λ_m assez faible et égal à 19.5 (compte tenu de la conductivité thermique dans la couche de nitrure de 0.5µm d'épaisseur). Or ces deux conditions sont très loin d'être réunies pour les capteur étudiés dans le chapitre II (émissivité moyenne comprise entre 0.5 et 0.3 et λ_m voisin de 40).

Pour s'en approcher il faut procéder à deux modifications de la structure du capteur:

1°) diminuer les épaisseurs de métallisation

2°) augmenter les épaisseurs de diélectrique (nitrure de silicium ou SiO_2) de façon à mieux absorber le rayonnement infra rouge en particulier dans les zones de la surface captant les radiations.

Cependant si en augmentant l'épaisseur de diélectrique, on obtient des émissivités plus proches de l'unité, on augmente également d'après la relation (I-56) la valeur de λ_m qui dépend non seulement de la conduction dans les métallisations mais aussi dans le diélectrique.

De ce fait l'augmentation de sensibilité liée à l'accroissement de l'émissivité peut être compensée par la diminution de $\Delta T/L$ liée à l'augmentation de λ_m. Un compromis doit donc être trouvé qui dépend des caractéristiques (conductivité thermique, pouvoir absorbant dans le domaine infrarouge) du diélectrique étudié.

Nous avons essayé d'illustrer quantitativement ces phénomènes dans les tableaux III 2 et III 3. Dans ce but nous avons utilisé les résultats obtenus dans le chapitre II concernant les émissivités correspondant aux capteurs revêtus de nitrure de silicium ou de silice. A partir de l'émissivité ε_2 concernant les zones comportant une métallisation, une estimation du pouvoir absorbant en infrarouge peut être obtenue et utilisée pour calculer les émissivités que l'on

	Epaisseur (µm)					
	0.5	1	2	3	4	6
a	0.852	0.723	0.5227	0.378	0.273	0.142
1-a	0.148	0.277	0.4773	0.622	0.727	0.858
ε_2	0.133	0.25	0.43	0.56	0.655	0.7722
ε_1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ε_T	0.5165	0.575	0.665	0.73	0.777	0.836
$\lambda_{m\ isolant}$	8	16	32	48	64	96
$\lambda_{m\ métal}$	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
$\lambda_{m\ total}$	19.5	27.5	33.5	59.5	75.5	107.5
$\Delta T/L$ (mK/m)	310	300	275	234	215	175
$\varepsilon_T \Delta T/L$(mK /m)	160	178.5	182	168	163	146

Tableau III 2- Evolution du rapport $\varepsilon_T \Delta T/L$ en fonction de l'épaisseur de nitrure de silicium (a représente le coefficient de réflexion d'une couche de nitrure de silicium sans tenir compte du dioptre d'entrée; ε_2# 0.9 (1-a)).

	Epaisseur (µm)					
	0.5	1	2	3	4	6
a	0.65	0.434	0.188	0.082	0.035	0.007
1-a	0.34	0.566	0.812	0.918	0.965	0.993
ε_2	0.306	0.51	0.75	0.85	0.8775	0.8937
ε_1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ε_T	0.605	0.705	0.825	0.875	0.889	0.895
$\lambda_{m\ isolant}$	1	2	4	6	8	10
$\lambda_{m\ métal}$	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
$\lambda_{m\ total}$	12.5	13.5	15.5	17.5	19.5	21.5
$\Delta T/L$(mK/ m)	325	320	315	312	310	305
$\varepsilon_T \Delta T/L$(mK /m)	196	226	259.8	273	275.5	273.2

Tableau III 3- Evolution du rapport $\varepsilon \Delta T/L$ en fonction de l'épaisseur de silice (x_1=50%,x_2=50%) pour une surface de 9mm² (même notation que dans le tableau III 2)

obtiendrait en utilisant des couches diélectriques de plus en plus épaisses. La diminution de ΔT liée à la conduction dans la couche diélectrique peut être calculée. Les résultats obtenus, en particulier sur le facteur $\varepsilon_T \Delta T/L$ qui détermine directement la sensibilité du capteur, sont donnés dans le tableau III 2 pour le nitrure de silicium et dans le tableau III 3 pour la silice. Les deux points suivant peuvent être soulignés:

- des épaisseurs comprises entre 2 et 4 microns sont nécessaires tant pour le nitrure que pour la silice pour obtenir une sensibilité maximale

- l'utilisation de la silice permet d'obtenir des sensibilités environ 50% supérieures à celle du nitrure compte tenu de sa conductivité thermique plus faible.

	$\Delta T/L$ (mK/m)	ε_T	$S\varphi$ ($\mu V/W/m^2$)	S_V (V/W)	S_T ($\mu V/°C$)	ΔT_{min} (mK)
SiO_2	310	0.89	24.8	2.75	141	17.58
Si_3N4	275	0.665	16.17	1.795	91	27.25

Tableau III 4 - Comparaison des résultats optimaux
en fonction de l'isolant pour une surface de 9mm²

Lorsque ces deux conditions sont respectées, l'émissivité devrait être proche de 0.9, le coefficient λ_m devrait être voisin de 10 et les sensibilités prévues dans le tableau III 1 devraient être atteintes voire dépassées si l'on utilise le SiO_2 (tableau III 4). Notons cependant que pour obtenir ces résultats, nous avons diminué d'un facteur deux les épaisseurs de métallisation. Compte tenu de ce fait mais aussi de la réduction des largeurs de piste qui se traduit par une augmentation conséquente du nombre de thermopiles élémentaires, la résistance électrique présentée par le capteur va augmenter assez considérablement et l'influence du bruit thermique peut limiter les performances du capteur. Un calcul simple utilisant les relations (I-49 et I-61) montre cependant que l'erreur maximale qui en résulte sur ΔT reste assez faible et de l'ordre de quelques centièmes de degré.

Il est donc possible en utilisant une lithographie plus fine, des diélectriques et des épaisseurs bien choisis, d'augmenter considérablement les performances par rapport à celles obtenues dans le chapitre II.

II 2 Etude des modifications du substrat afin d'obtenir une sensibilité plus élevée.

Des résultats encore plus intéressants pourraient sans doute être obtenus si l'on pouvait obtenir des substrats de conductivité thermique plus faible que le verre. Malheureusement les matériaux compatibles avec une technologie micro-électronique ne sont pas très nombreux. Une possibilité intéressante est constituée par le polyimide de conductivité thermique dix fois plus faible mais qui ne peut être déposé qu'en épaisseur relativement faible (quelques microns).

Malgré cette faible épaisseur, l'utilisation de ce type de matériau pourrait peut être apporter une amélioration à condition de procéder de la façon suivante:

1°) dépôt d'une épaisseur de polyimide sur le substrat de verre avant de procéder à la réalisation des thermopiles afin d'augmenter l'isolation avec le puits thermique.

2°) suppression compléte du substrat de verre et dépôt direct du polyimide d'épaisseur assez faible sur le plan métallique constituant le puits thermique puis la réalisation sur le polyimide de l'ensemble des thermopiles. Dans ce cas, il faudra réduire la longueur de la cellule puisque la théorie analytique comme les simulations numériques prévoient qu'il faut diminuer celle ci lorsque l'on réduit l'épaisseur du substrat.

Afin d'estimer la possibilité offerte par le premier procédé, nous avons effectué la simulation d'une structure « sandwich » polyimide verre et les résultats obtenus sont donnés sur la figure 45. On remarque que l'amélioration obtenue en $\Delta T/L$ et donc en sensibilité peut

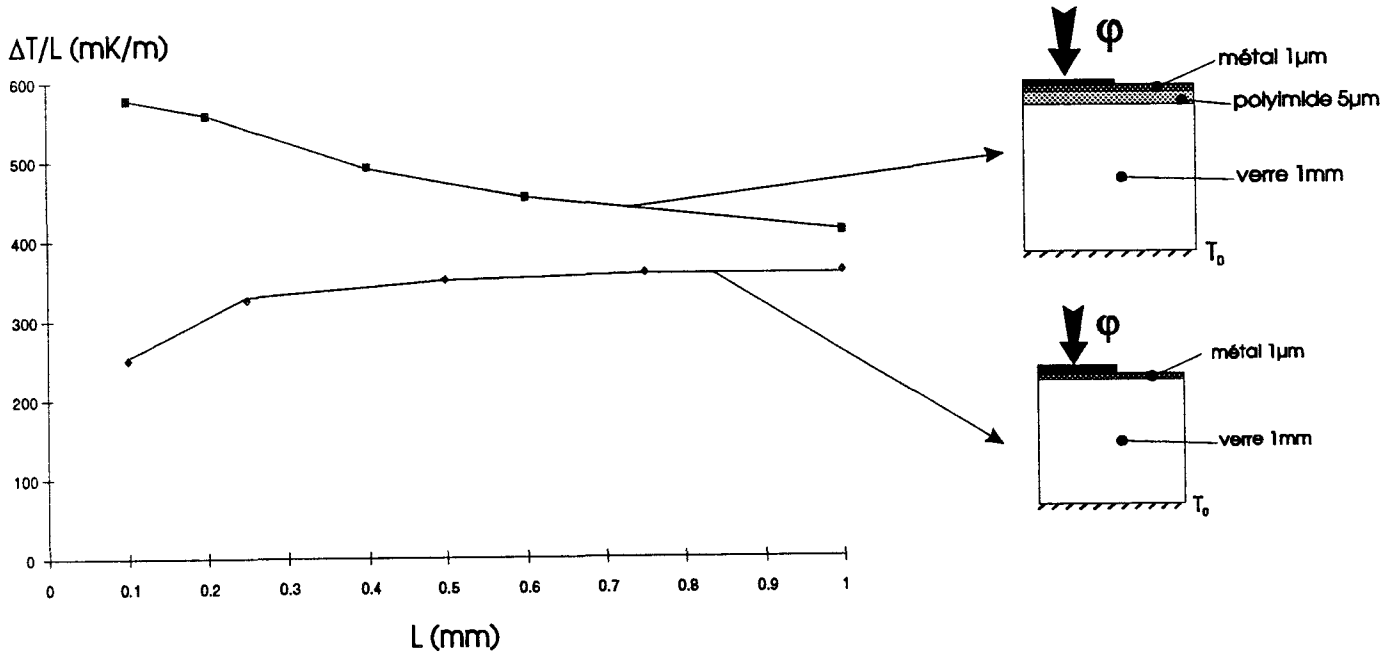


Fig 45 - Evolution du rapport ΔT/L pour une structure en verre classique et un substrat de verre recouvert d'une couche de polyimide pour un λ_m=10

approcher 100%. Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas eu le temps de procéder à des réalisations technologiques afin de vérifier expérimentalement cette possibilité. Néanmoins à partir du capteur de la série 4 réalisé sur substrat de verre d'épaisseur assez faible (e=170µm),

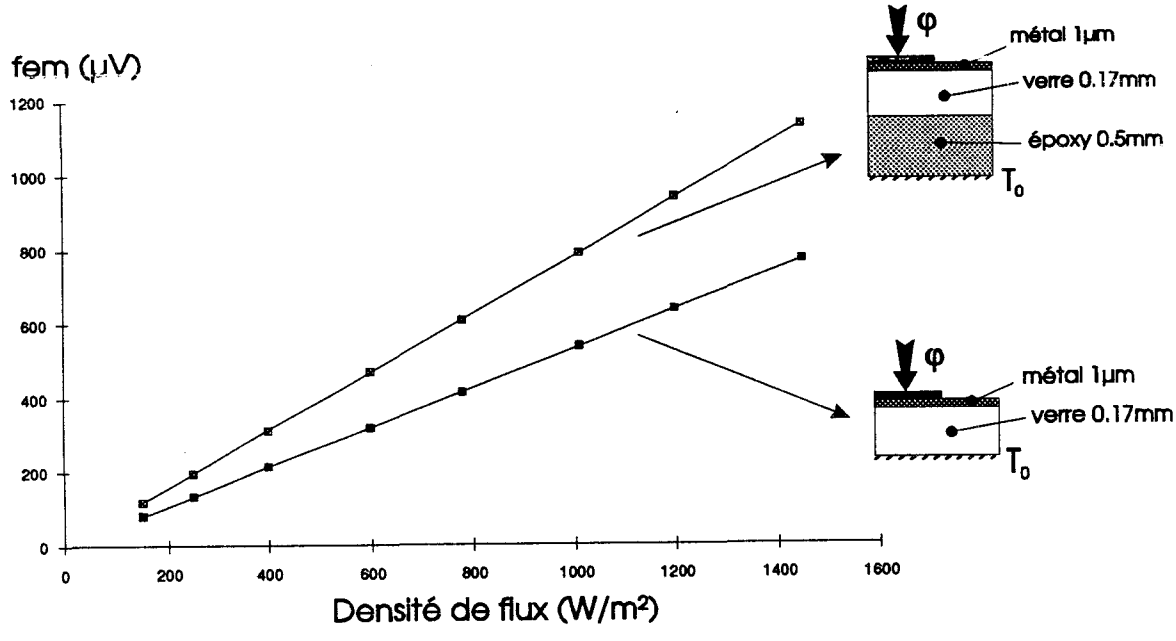


Fig 46 - Fem détectée en fonction de la densité de flux incidente pour un substrat de verre de 170µm placé directement sur un puits thermique et sur une lamelle d'époxy

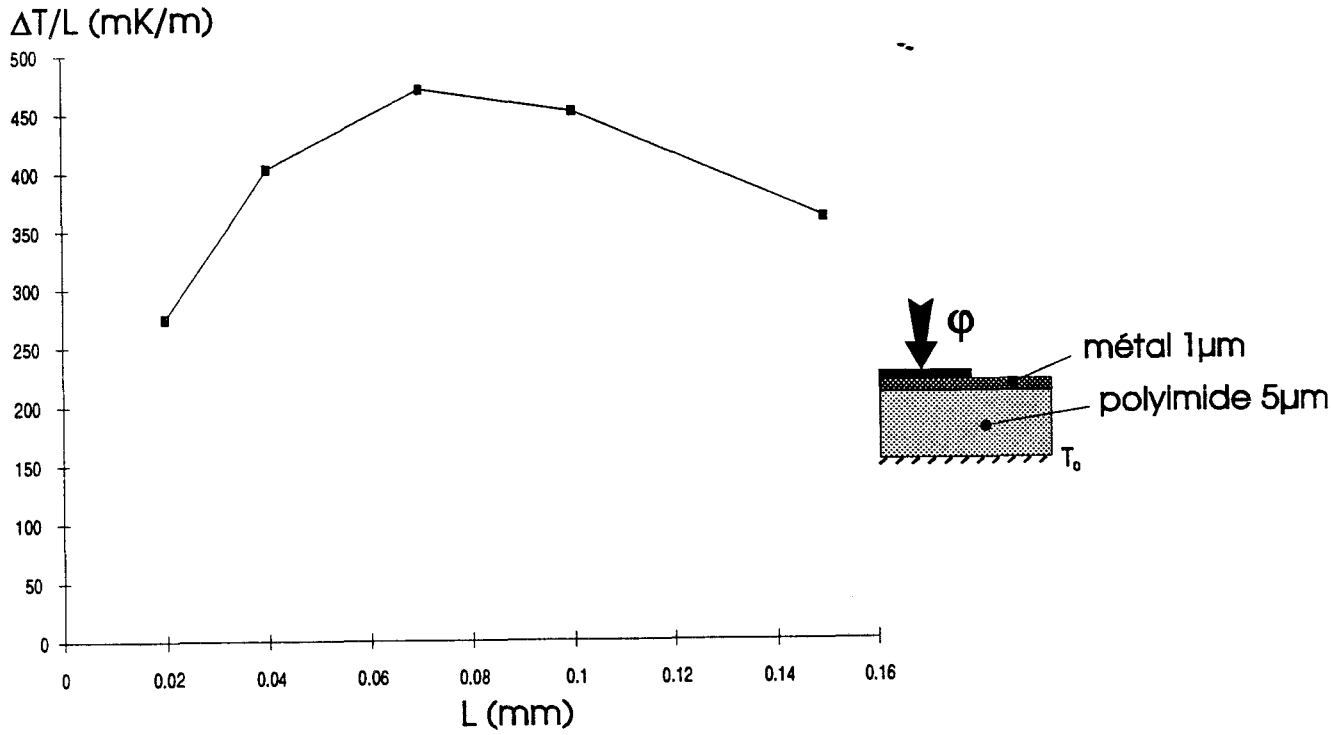


fig 47 - Evolution du rapport ΔT/L pour une structure en polyimide déposée directement sur un puits thermique (λ_m=10)

nous avons réalisé un sandwich en déposant le substrat de verre sur une lame d'époxy de conductivité thermique deux fois plus faible et les résultats obtenus représentés sur la figure 46 montre une augmentation significative de la sensibilité.

Afin d'estimer l'augmentation de performance ouverte par le second procédé, nous avons simulé une structure utilisant un « substrat de polyimide » déposé directement sur le puits thermique. Nous avons retenu une épaisseur de polyimide de 5 microns (il est difficile de déposer par les procédés utilisés dans nos laboratoires des couches plus épaisses). Les résultats obtenus en ΔT/L sont représentés sur la figure 47, comme nous l'avions prévu les meilleurs résultats sont obtenus pour des longueurs de cellule L beaucoup plus faibles que dans les cas précédents (L_{opt}=80µm). Néanmoins la valeur optimale de ΔT/L n'est pas aussi élevée que l'on aurait pu espérer compte tenu de la conductivité thermique du polyimide et ce fait peut s'expliquer compte tenu du rôle croissant joué lorsque l'épaisseur de substrat diminue par les phénomènes de conduction dans les métallisations. Cependant compte tenu de la simplicité de

réalisation du capteur de température ainsi constitué (qui peut être fabriqué pratiquement sur n'importe quel support métallique), compte tenu aussi des sensibilités élevées obtenues et résumées dans le tableau III 5, la structure proposée peut s'avérer intéressante dans un certain nombre d'applications.

	e_{Poly} (µm)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	e_{Si3N4} (µm)	e_{Au} (µm)	e_{Cn} (µm)	A (mm^2)
Dimen-sions	5	1	1	75	3	0.1	0.35	9

Simulation effectuée	ε_T	$\Delta T/L$ (mK/m)	$S\varphi$ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/°C)	ΔT_{min} (mK)
	0.89	470	38.07	4.23	216.78	11.48

tableau III 5 - Performances théoriques du capteur réalisé sur une couche de polyimide.

II3 Etudes des modifications de la géométrie du puits thermique afin d'augmenter encore la sensibilité.

Un des moyens d'accroître la sensibilité du capteur est d'augmenter la résistance thermique entre l'ensemble des jonctions chaudes et le puits thermique. Un procédé simple pour obtenir ce résultat est de supprimer comme le montre la figure 48 le puits thermique situé sous la surface captant le rayonnement infrarouge de façon à augmenter pour une même puissance incidente l'élévation de température T_1-T_2.

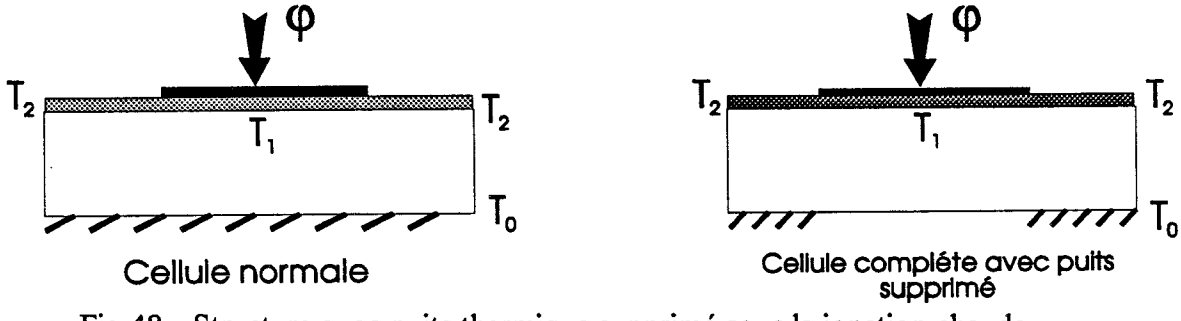


Fig 48 - Structure avec puits thermique supprimé sous la jonction chaude

Afin d'évaluer l'augmentation de T_1 et donc de $\Delta T=T_1-T_2$ que l'on peut ainsi réaliser, nous avons procédé à de nouvelles simulations. Afin de limiter simultanément les phénomènes de conduction à travers le substrat entre jonctions chaudes et froides, nous avons réduit l'épaisseur de substrat. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure 49 où pour deux épaisseurs de substrat (e=200µm et e=400µm), nous avons étudié l'évolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de L. On peut remarquer que par rapport à la structure caractérisée par un puits thermique continu, $\Delta T/L$ et donc la sensibilité du capteur est très sensiblement augmentée. L'effet est d'autant plus important que l'épaisseur du substrat est réduite et L important.

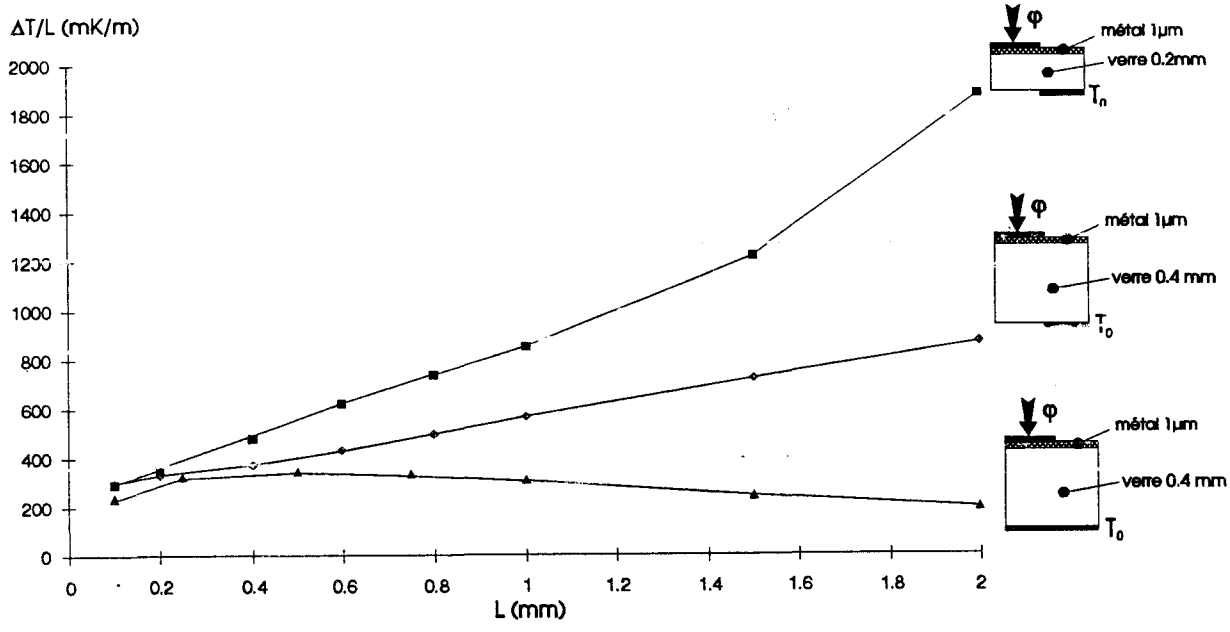


Fig 49 - Comparaison de l'évolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction L pour des structures avec puits thermique uniforme et puits thermique supprimé

	e_V (µm)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	e_{Si3N4} (µm)	e_{Au} (µm)	e_{Cn} (µm)	A (mm^2)
Dimen-sions	200	1	1	2000	3	0.1	0.35	9

Simulation effectuée	ε_T	$\Delta T/L$ (K/m)	$S\varphi$ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/°C)	ΔT_{min} (mK)
	0.89	1.8	130	14.42	739.07	3.37

tableau III 6 - Performances théoriques du capteur réalisé en supprimant une partie du puits thermique

Dans le tableau III 6, nous donnons un exemple des sensibilités qui pourraient être obtenues en choisissant comme isolant du nitrure de silicium de 3 microns d'épaisseur et un substrat de verre de 200µm. On devrait obtenir ainsi des sensibilités 100 fois plus importantes que celles obtenues avec les capteurs sur verre dont la réalisation est décrite dans le chapitre II.

Malheureusement, en supprimant le puits thermique sous la surface exposée au rayonnement infrarouge, nous avons rompu la symétrie du capteur et la résistance thermique entre la jonction chaude et le puits thermique n'est plus égale à la résistance entre la jonction froide et le puits thermique. De ce fait la sensibilité aux phénomènes de conduction et de convection se produisant dans l'environnement du capteur doit être augmentée et c'est bien de que l'on constate dans les résultats de simulation, représentés sur la figure 50, qui prennent en compte d'éventuels phénomènes de convection (caractérisés par le coefficient h). On constate que lorsque h varie entre 0 et 200, (c'est en première approximation la variation maximale que l'on peut réaliser dans un milieu gazeux), la sensibilité du capteur peut varier d'un facteur deux.

Pour éviter cet écueil, tout en maintenant des sensibilités extrêmement élevées, le seul moyen est de réaliser le capteur sur membrane de façon à isoler le plus complètement possible aussi bien les jonctions chaudes que les jonctions froides du puits thermique. Nous nous proposons d'étudier tant théoriquement qu'expérimentalement cette nouvelle façon de procéder dans la dernière partie de ce chapitre.

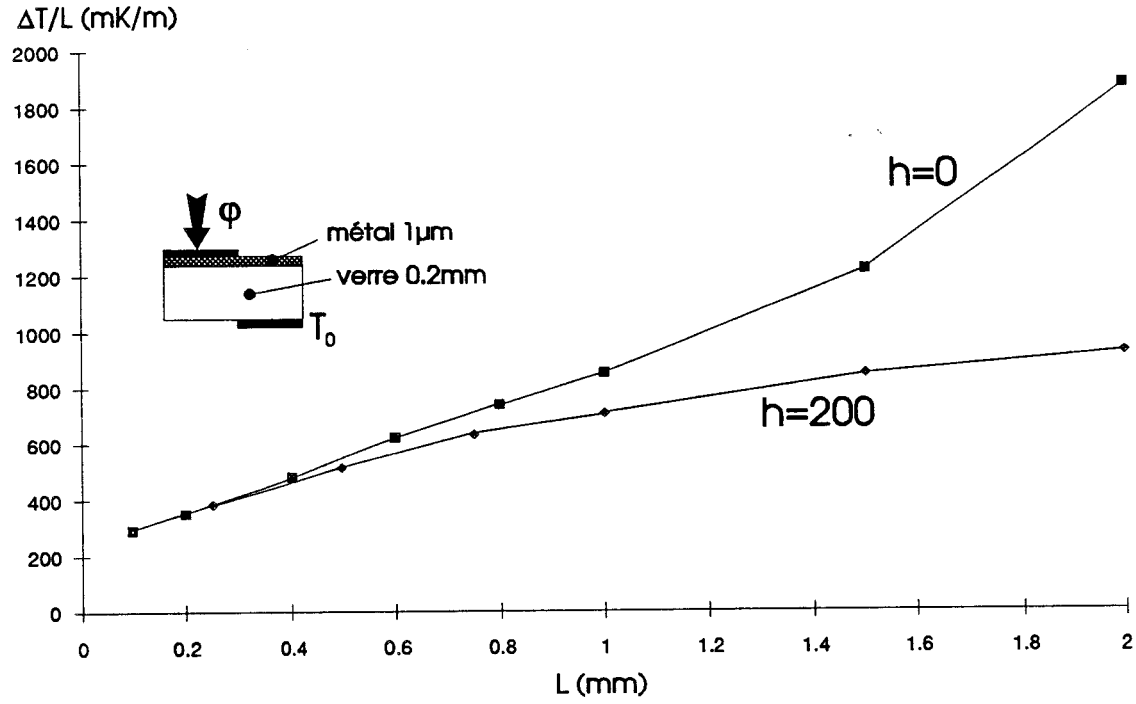


Fig 50 - - Evolution du rapport ΔT/L en fonction L
pour une structure avec puits thermique supprimé en fonction de la convection

III Optimisations et premières réalisations de capteurs USTL sur membranes ou sur ponts diélectriques

III 1 Premières évaluations de l'avantage apporté par une membrane

L'élévation de température des jonctions chaudes dépend en premier lieu de l'importance des phénomènes de conduction avec d'une part le puits thermique et d'autre part avec l'ensemble des jonctions froides. Pour limiter les premiers, il faut réaliser les thermopiles sur une membrane séparée du puits thermique par exemple par une couche d'air (λ=0.025) d'épaisseur suffisante (nous montrerons qu'une épaisseur de l'ordre de 400µm semble réalisable pratiquement), pour limiter les seconds, il faut que la membrane soit aussi fine et isolante que possible. Pour réaliser cette dernière condition, une couche de polyimide de 2 µm d'épaisseur peut constituer un bon choix. Les résultats obtenus par simulation numérique dans ces conditions sont reportés sur la figure 51; l'évolution de ΔT/L est représentée en fonction de L. On note que par rapport au cas où un substrat de verre était utilisé, on obtient avec des

épaisseurs de métallisation identiques et une couche de SiO_2 de 3µm une valeur prés de 30 fois plus élevé du rapport ΔT/L et donc des sensibilités du capteur (les résultats correspondants sont reportés dans le tableau III 7).

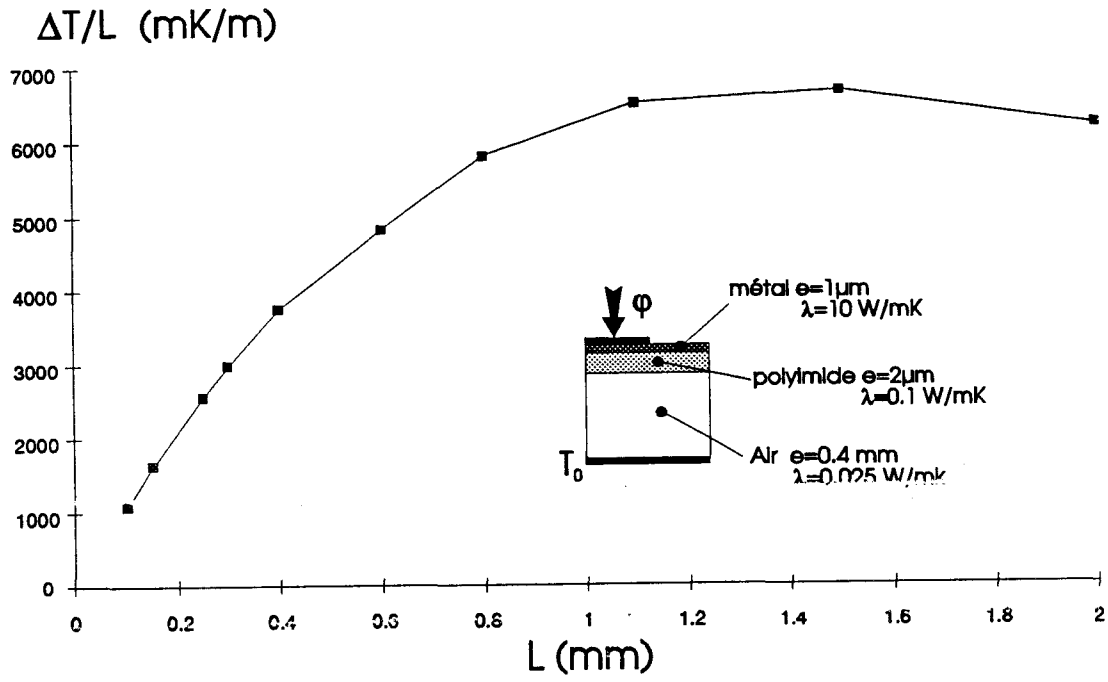


Fig 51 - Evolution du rapport ΔT/L en fonction L
pour un capteur en membrane polyimide

	e_{Air} (µm)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	e_{SiO2} (µm)	e_{Au} (µm)	e_{Cn} (µm)	A (mm^2)
Dimen-sions	400	1	1	1200	3	0.1	0.35	9

Simulation effectuée	ε_T	ΔT/L (K/m)	Sφ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/°C)	ΔT_{min} (mK)
	0.89	6.3	510.3	56.7	2893	0.86

tableau III 7 - Performances théoriques du capteur
réalisé sur une membrane de polyimide

Les performances de ce nouveau type de capteur sont particulièrement encourageantes et il nous faut maintenant étudier comment le réaliser.

III 2 Première réalisation de capteurs USTL à partir d'un substrat semi conducteur.

Pour réaliser facilement une membrane, le procédé le plus simple est de partir d'un substrat semi conducteur facilement attaquable chimiquement par des solutions acides qui n'endommagent pas la couche de polyimide. Compte tenu de l'expérience de la Centrale de Technologie de l'IEMN, le semi conducteur retenu est le GaAs qui présente par ailleurs une conductivité thermique plus faible que celle du silicium.

Avant de réaliser un capteur sur membrane, les premiers essais de réalisation d'un capteur de type USTL ont été effectués en laissant le substrat semi conducteur sous les thermopiles. Dans ce but, les procédés de réalisation et les masques optiques utilisés dans la réalisation du capteur sur verre ont été de nouveau utilisés. Les caractéristiques de la structure réalisée ainsi que les performances expérimentales obtenues sont données dans le tableau III 8.

	e_{GaAs} (µm)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	e_{Si3N4} (µm)	e_{Au} (µm)	e_{Cn} (µm)	A (mm²)
Dimen-sions	400	20	10	300	1	0.2	0.7	9

résultats	ε_T	$S\varphi$ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/°K)	$\varepsilon_{T\,EXP}$	λ_{GaAs}
numéri-ques	1	0.04	0.0044	0.225	0.225	55
expérimen-tal	0.225	0.009	0.001	0.051	0.225	55

tableau III 8 - Performances théoriques et expérimentales du capteur réalisé sur un substrat semi conducteur de GaAs

Les sensibilités obtenues sont très faibles et ce résultat était prévisible compte tenu du fait que la conductivité thermique du GaAs est plus de cinquante fois supérieure à celle du verre. Une simulation numérique a été effectuée pour déterminer les sensibilités théoriques en admettant une émissivité égale à l'unité. Comme nous l'avons effectué dans le chapitre II, la

comparaison avec les valeurs obtenues expérimentalement permet d'obtenir l'émissivité « expérimentale » ε_T de la surface captant les radiations. La valeur obtenue (0.225) est plus faible que celle obtenue pour un capteur sur verre de mêmes caractéristiques géométriques. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que:

- le GaAs est beaucoup moins absorbant que le verre dans le domaine infrarouge correspondant au maximum du rayonnement thermique.

- le GaAs est caractérisé par une permittivité plus élevée que celle du verre et donc doit présenter un coefficient de réflexion plus important que celui correspondant au verre.

III 3 Premières réalisations de capteurs sur membrane

Ce premier essai effectué, nous avons tenté de réaliser le même type de capteur sur une membrane. Les différents procédés utilisés sont résumés sur la figure 52. Les dimensions géométriques et donc les masques utilisés sont identiques à ceux employés dans la réalisation des capteurs sur verre de longueur L=150µm. Le substrat de départ utilisé en GaAs semi isolant a une épaisseur de 400µm. Une couche de polyimide de 1.8 µm est tout d'abord déposée sur le GaAs. On procède alors à la réalisation du capteur type USTL de façon identique à celle utilisée pour les dispositifs sur substrat de verre. Il faut alors réaliser la membrane en attaquant la partie du substrat de GaAs située sous l'ensemble des thermopiles : aussi bien les jonctions chaudes ainsi que les jonctions froides. Dans ce but, on part de la face arrière du substrat: par lithographie optique, on protège la zone du substrat qui ne doit pas être gravée. On peut alors procéder à l'attaque complète des 400µm de GaAs à partir d'une solution d'acide ($H_2O+H_2O_2+H_2SO_4$) et les temps de gravure nécessaires sont de l'ordre de 40 minutes. Les dimensions de la membrane sont 3.5*3.5mm²; il en résulte que sur une longueur de piste égale à celle de la membrane sont disposées dix cellules élémentaires.

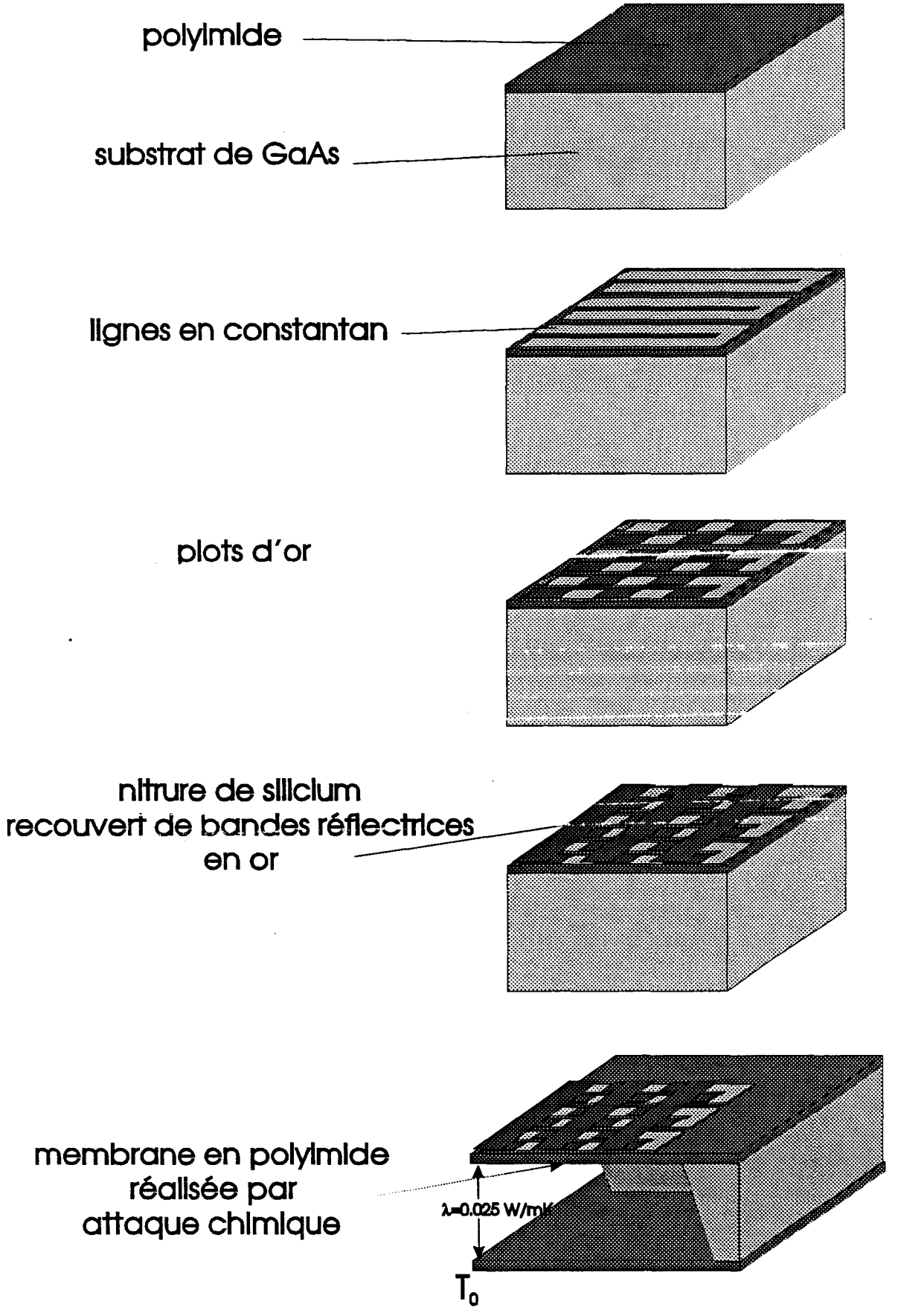


fig 52 - Réalisation de capteur sur membrane

Les caractéristiques exactes géométriques des capteurs ainsi réalisés sont données dans le tableau III 9 ainsi que les performances expérimentales obtenues. Elles sont très largement inférieures à celle que l'on pouvait espérer à partir des résultats préliminaires obtenus par simulation, il est vrai, sur une structure de caractéristiques fort différentes. Cet écart semble donc pouvoir s'expliquer. Dans cette toute première réalisation, les largeurs de piste et d'interpiste utilisées ne sont pas microniques, les épaisseurs de métallisations sont très importantes et surtout la longueur de cellule retenue (L=150µm) est très inférieure à la valeur optimale (L=1200µm)

	e_{Air} (µm)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	e_{Si3N4} (µm)	e_{Au} (µm)	e_{Cn} (µm)	A (mm²)
Dimensions	400	20	10	150	1	0.2	0.7	9

	S_φ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/°C)	ΔT_{min} (mK)
valeurs expérimen-tales	1.21	0.134	6.86	20.3

tableau III 9 - Performances expérimentales du capteur réalisé sur une membrane en polyimide

BU LILLE

Des comparaisons plus précises entre théorie et expérience peuvent d'ailleurs être effectuées. Afin de bien identifier les effets pouvant résulter du nombre limité de thermopiles élémentaires réalisées sur une longueur de membrane et l'influence éventuelle des parties du substrat GaAs « supportant » la membrane, différentes géométries représentées sur la figure 54 pour le capteur et son puits thermique ont été simulées en essayant de définir progressivement des caractéristiques se rapprochant de plus en plus de la structure réelle (fig 53).

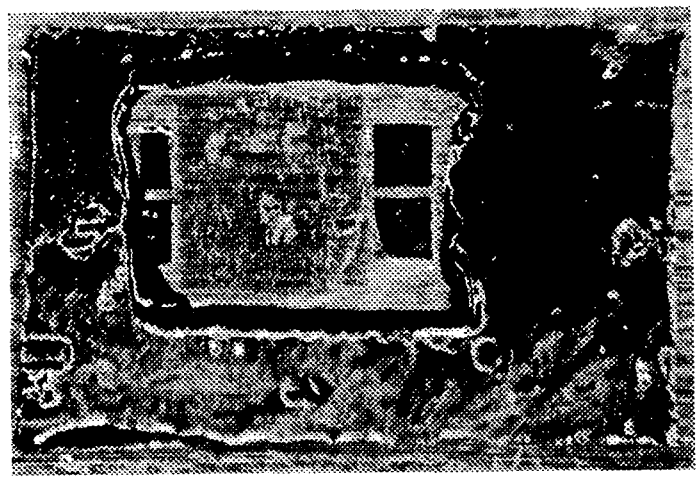


fig 53 - Réalisation de capteur sur membrane sur GaAs
Vue de derriére

La première notée A se limite à une cellule élémentaire ce qui suppose implicitement que le nombre de thermopiles situées sur une longueur de membrane est infini; dans ces conditions le seul puits thermique existant est un plan de température T_0 séparé de la membrane par une couche d'air de 400µm d'épaisseur.

La seconde notée B tient compte du nombre limité de thermopiles sur une longueur de membrane et du refroidissement aux extrémités de la membrane apporté par la partie du substrat GaAs supportant la membrane. Compte tenu de la conductivité thermique élevée du GaAs, la température du substrat GaAs est prise égale à la température T_0 et deux puits thermiques de température T_0 situés à chaque extrémité du capteur sont utilisés dans les calculs. Par contre, contrairement au premier cas, la simulation numérique est effectuée complètement pour les dix thermopiles correspondant, dans la réalisation effectuée, à une longueur de membrane. La sensibilité du capteur total est alors déterminée en additionnant les différences de température $\Delta T = T_1 - T_2$ des 10 thermopiles (différences de température ΔT qui, compte tenu des effets d'extrémité, ne sont plus identiques).

	$S\varphi$ ($\mu V/W/m^2$)	S_V (V/W)	S_T ($\mu V/°C$)	ε_T
Expérimental	1.21	0.134	6.83	0.366
A	2.574	0.286	15.56	1
B	4.85	0.538	27.4	1
C	3.57	0.396	20.17	1
D	3.3	0.366	18.64	1

tableau III 10 - Performances expérimentales et numériques du capteur sur membrane

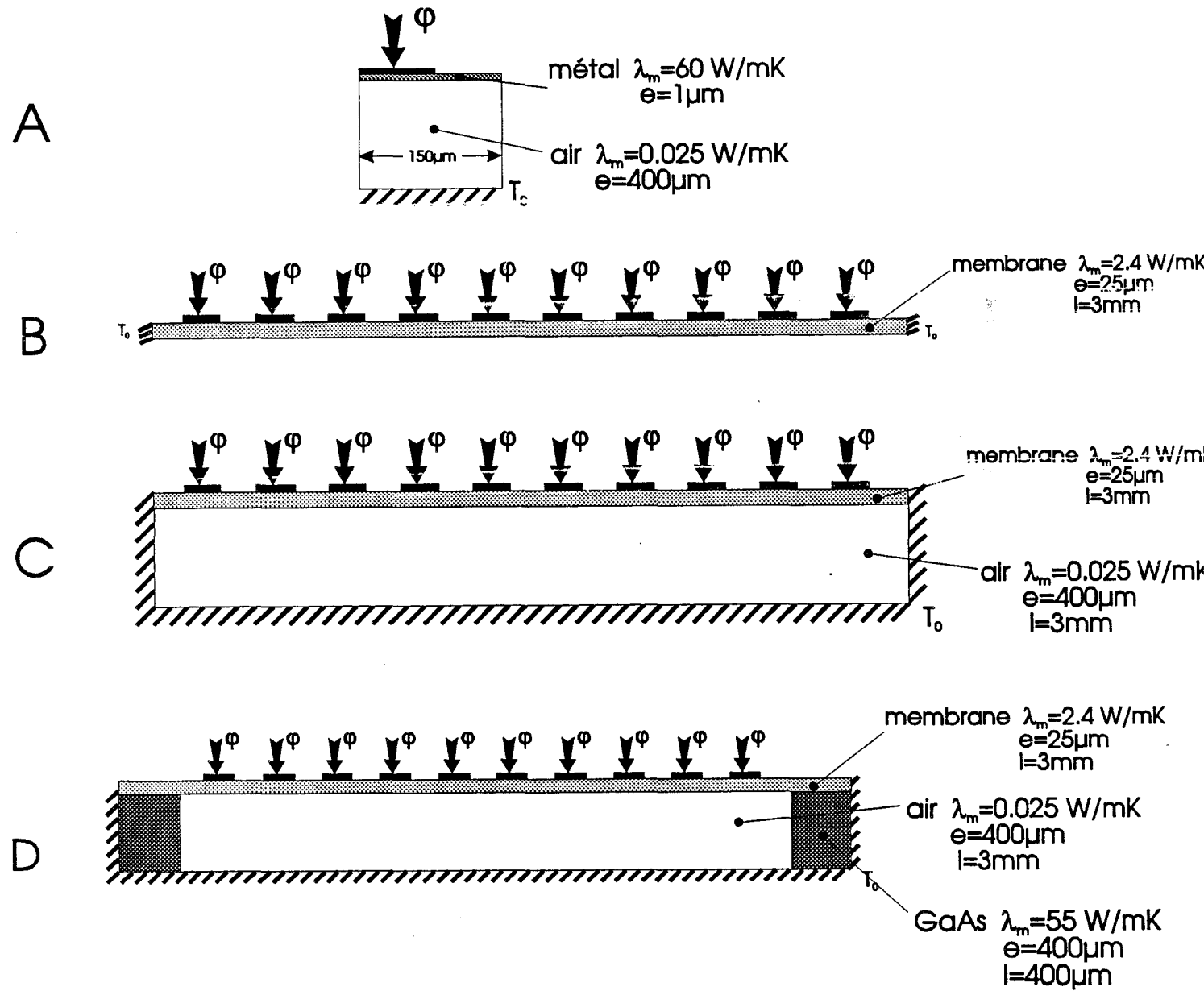


fig 54 - Différentes géométries utilisées pour le calcul numérique

La troisième notée C tient compte des effets d'extrémités précédents mais aussi du refroidissement apporté par le puits thermique constitué par le support métallique supportant le reste du substrat GaAs et séparé de la membrane par une couche d'air de 400μm d'épaisseur.

Dans la quatrième, notée D, on tient compte plus exactement des effets de conduction thermique dans le GaAs aux extrémités de la membrane. Pour ce faire, la simulation thermique est effectuée aussi dans le substrat semi conducteur qui constitue le pilier de la membrane et dont la conductivité thermique n'est plus supposée égale à l'infini.

La simulation numérique effectuée dans le cas du modèle D apparaît la plus réaliste et nous retiendrons donc les sensibilités obtenues dans ce dernier cas. Une comparaison avec les sensibilités expérimentales permet ici encore d'obtenir l'émissivité expérimentale du capteur à partir du rapport entre sensibilité expérimentale et théorique. La valeur obtenu 0.366 peut s'interpréter en considérant que:

- d'une part un tiers de la surface devant capter les radiations est composé de polyimide de deux microns d'épaisseur dont l'émissivité en infra rouge (qui dépend de son coefficient d'absorption) sera notée ε_2.

-d'autre part que les deux tiers restant sont composés de nitrure déposé sur un plan réfléchissant l'infrarouge.

Sachant que pour ce dernier type de surface, nous avons déjà obtenu, chapitre II, l'ordre de grandeur de l'émissivité ε_1 soit environ 0.26, nous pouvons estimer l'émissivité ε_2 à environ 0.578. Cette valeur semble d'un bon ordre de grandeur et l'on peut donc considérer que les résultats obtenus par simulation pour la géométrie étudiée sont assez bien vérifiés expérimentalement.

Cette constatation est intéressante dans la mesure où elle montre que les prévisions théoriques données dans le tableau III 7 et se traduisant par des performances remarquablement élevées devraient pouvoir se concrétiser expérimentalement. Bien entendu, pour qu'il en soit ainsi, il faudra être en mesure de réaliser pratiquement la structure définie en III 7.

L'avantage de ce type de structure est qu'il permet théoriquement de réaliser un capteur de performance très élevée insensible aux phénomènes de conduction et de convection résultant de la présence de l'objet à mesurer ou d'une différence de température entre le capteur et son environnement (compte tenu de la symétrie des résistances thermiques). Il faut cependant ne pas oublier que la sensibilité du capteur peut dépendre de son environnement et tout particulièrement de l'atmosphère gazeuse dans laquelle il est placé. Nous avons donc tenté sur le premier capteur de ce type réalisé technologiquement d'évaluer cette variation. Les résultats obtenus en plaçant successivement le capteur dans l'air, dans du gaz carbonique et de l'hélium sont représentés sur la figure 55. On remarque que la sensibilité dépend significativement de la conductivité thermique λ du gaz utilisé et il apparaît que celle ci est d'autant plus élevée que λ est faible. Ainsi $S\varphi$ diminue très légèrement lorsque le CO_2 (λ=0.012) est remplacé par de l'air (λ=0.025) mais décroît de prés d'un facteur deux lorsque l'on utilise l'hélium (λ=0.156). La dépendance de $S\varphi$ en fonction de la nature du gaz entourant le capteur pourrait être utilisée pour réaliser un capteur sensible à la composition de l'atmosphère ambiante et une optimisation de la structure pour ce type d'application est très facilement envisageable en diminuant largement la distance entre la membrane et le puits thermique. Dans le cas d'un capteur de température à distance, l'influence de la nature du gaz

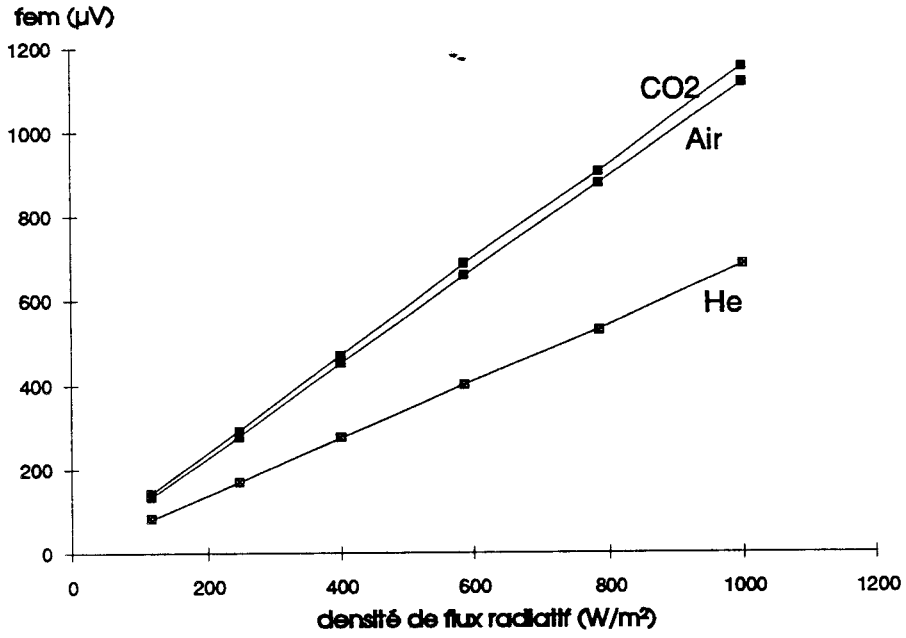


fig 55 - Evolution de la tension détectée par un capteur sur membrane en fonction de la densité de flux incident et de la nature de gaz

ambiant peut constituer une source d'erreur importante. Elle résulte essentiellement des variations de la résistance thermique entre la membrane et le puits thermique. Une façon simple de s'en affranchir serait de rendre étanche le volume compris entre la métallisation constituant le puits thermique et la couche de polyimide constituant la membrane afin qu'un gaz étranger ne puisse le remplir et modifier la résistance thermique.

III 4 Première réalisation de capteur sur pont.

Afin d'expérimenter les différentes techniques permettant d'augmenter la sensibilité du capteur, nous avons effectué les premiers essais de réalisation de structure utilisant la technique du pont à air. Dans ce cas la différence de température entre les jonctions chaudes et froides (soumises de façon identique au rayonnement IR) résulte de la différence entre les résistances thermiques présentées entre les deux types de jonctions et le puits thermique. Pour les

jonctions chaudes placées sur les ponts, la valeur de résistance thermique est très élevée, par contre pour les jonctions froides placées sur des piliers en GaAs très conducteurs celle ci est très faible.

La réalisation pratique d'un capteur de ce type est illustrée sur la figure 56 .Au départ, les procédés utilisés sont identiques à ceux utilisés pour les capteurs sur verre et les masques de lithographie optique utilisés sont les mêmes. La piste en constantan est tout d'abord déposée directement sur le substrat de GaAs. Les thermopiles sont alors formées en déposant les plots en or et l'ensemble est recouvert d'une couche de nitrure de silicium de 1 micron d'épaisseur. Il faut alors attaquer le substrat GaAs sous les pistes constituant les jonctions chaudes. Dans ce but, il nous faut en premier lieu enlever le nitrure de silicium couvrant les zones non métallisées (interpistes). Aprés protection par une résine photosensible du nitrure de silicium recouvrant la piste métallique, on procède donc à une gravure ionique réactive utilisant du CF_4 et on peut ainsi graver le nitrure recouvrant les interpistes et dégager le substrat semi conducteur.

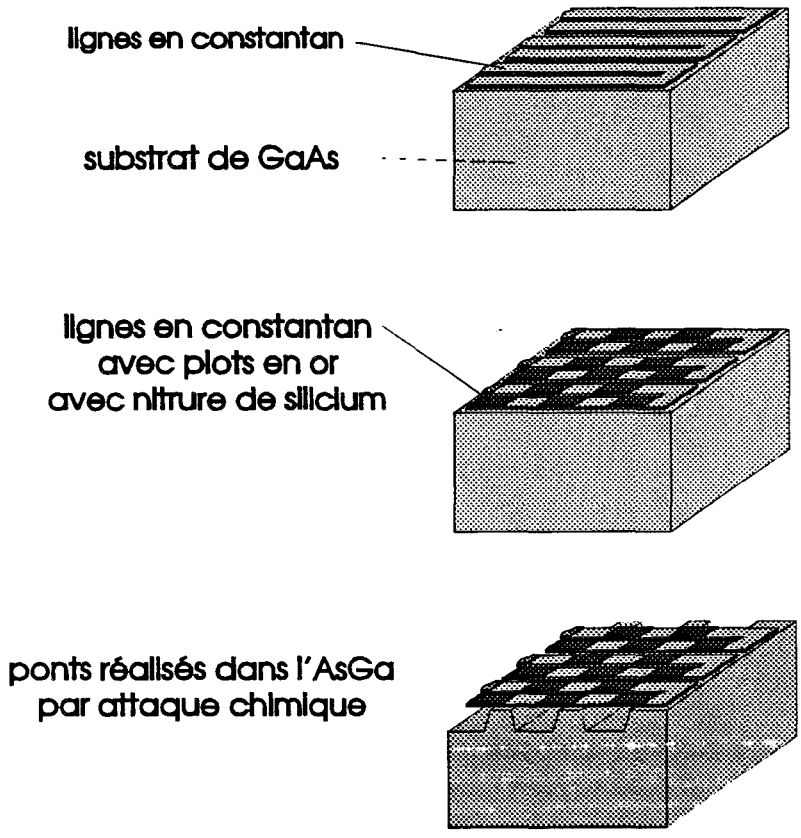
Il nous faut alors graver le GaAs. La solution chimique utilisée doit:

- être suffisamment isotrope pour attaquer le GaAs non seulement en profondeur mais également en largeur pour désolidariser du substrat les pistes constituant les jonctions chaudes,

- ne pas attaquer le constantan.

Aprés de nombreux essais, la solution retenue a été obtenue en mélangeant de l'ammoniaque avec de l'eau oxygénée et de l'eau non purifiée. Elle nous a permis de réaliser sous les jonctions chaudes des cavités de 200 microns de largeur. Dans ces conditions, la partie de la piste où se situent les jonctions chaudes est suspendue dans l'air entre deux piliers en GaAs ou se trouvent les jonctions froides.

Le tableau III 11 rassemble les différentes caractéristiques du capteur réalisé ainsi que les différentes sensibilités obtenues expérimentalement. Une comparaison avec les résultats



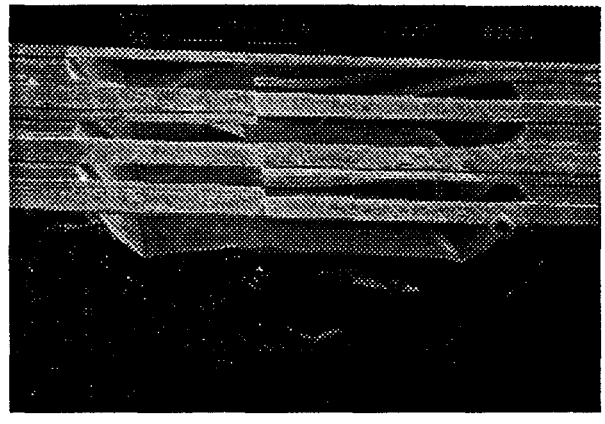


fig 56 - Réalisation d'un capteur en pont

obtenus théoriquement a été tentée. La structure simulée numériquement est représentée sur la figure 57; elle est aussi proche que possible de celle que nous pensons avoir réalisée en pratique. Les résultats obtenus sur ordinateur sont également donnés dans le tableau III 11. On remarque que la sensibilité obtenue expérimentalement est légèrement supérieure à celle prévue

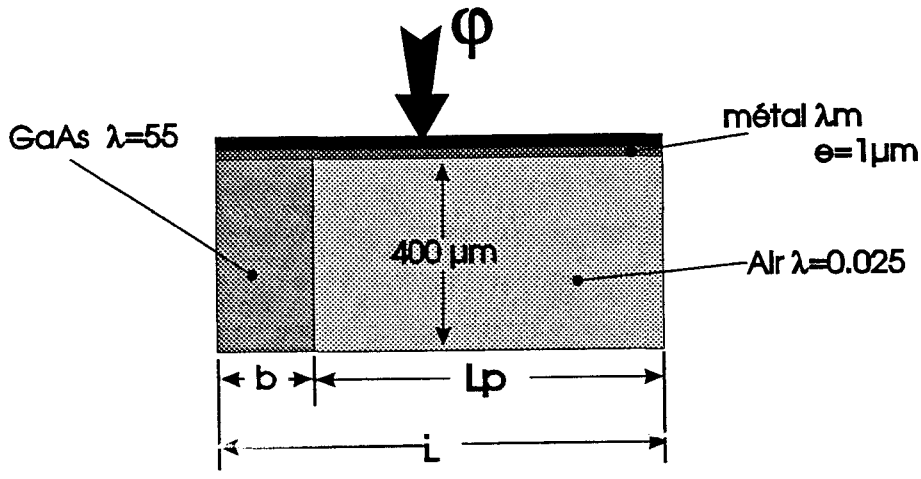


fig 57 - Structure simulée numériquement

théoriquement et cet écart peut paraître étonnant compte tenu du fait que l'émissivité équivalente de la surface du capteur recevant le rayonnement IR doit être assez faible (le rayonnement infrarouge ne pouvant être absorbé que par le nitrure situé au dessus des métallisations). Cependant, dans cette première réalisation technologique, les paramètres caractérisant la structure sont assez mal maîtrisés et sont donc connus avec très peu de précision.

Dans le cas où la demi longueur Lp du pont serait un peu plus importante (120 au lieu de 100 microns) et les épaisseurs de métallisations plus faibles, les sensibilités obtenues et reportées dans le tableau III 12 seraient nettement plus élevées et « l'émissivité expérimentale » serait égale a

$$\varepsilon_T = \frac{S\varphi_{Exp}}{S\varphi}$$

soit en prenant les valeurs numériques obtenues dans le tableau III 12 ε_T=0.41. Un tel résultat apparaît finalement assez plausible.

	e_{Air} (µm)	l (µm)	i (µm)	L (µm)	e_{Si3N4} (µm)	e_{Au} (µm)	e_{Cn} (µm)	L_p (µm)	b (µm)	A (mm²)
Dimensions	400	20	10	150	1	0.2	0.7	100	50	9

	$S\varphi$ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/°C)
valeurs expérimentales	6.47	0.718	36.7
valeurs numériques	5.91	0.656	33.45

Tableau III 11 - Caractéristiques et performances expérimentales du capteur en pont.

λ_m	b (µm)	L (µm)	Lp (µm)	$S\varphi$ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/)C)	ε_T
20	30	150	120	15.72	1.746	88.98	1

Tableau III 12 - Caractéristiques et performances numériques du capteur en pont.

Il semble donc que les sensibilités prévues théoriquement sont du même ordre de grandeur que celles obtenues expérimentalement. De ce fait, il apparaît intéressant d'utiliser la simulation numérique pour évaluer les performances que l'on pourrait obtenir avec un capteur en pont optimisé. Les caractéristiques du dispositif réalisé sont en effet très loin d'être optimales. L'utilisation de silice, de largeur de piste micronique, de longueur de cellule plus élevée ainsi que des métallisations moins épaisses devaient permettre d'obtenir des performances très largement supérieures. Dans le tableau III 13, nous donnons les valeurs obtenues théoriquement pour différentes géométries de capteurs dont le dernier optimisé se révèle particulièrement performant.

λ_m	b (µm)	L (µm)	Lp (µm)	l+i (µm)	Sφ (µV/W/m²)
50	30	150	120	30	6.77
10	30	150	120	30	28.42
10	30	150	120	2	426.3
10	25	775	750	2	1195

Tableau III 13 - Valeurs théoriques pour un capteur en pont optimisé

Soulignons malheureusement que ce type de capteur présente l'inconvénient majeur d'être particulièrement sensible à son environnement et aux phénomènes de conduction en provenance de l'objet à mesurer. Comme nous l'avons montré dans le premier chapitre cette propriété résulte de la dissymétrie des résistances thermiques jonction puits thermique. Elle peut se traduire par des erreurs importantes quand on mesure la température d'un matériau peu éloigné de la surface sensible du capteur.

Afin de mettre en évidence cet effet, nous avons utilisé le capteur sur pont dont nous avons décrit la réalisation. Un corps noir de température croissante a été placé à proximité immédiate (quelques centimètres de la surface sensible du capteur) en premier lieu à l'air libre et en second lieu dans une atmosphère d'hélium. L'évolution de la force électromotrice à la sortie du capteur en fonction du flux radiatif émis par le corps noir est représentée sur la figure 58. Contrairement aux résultats obtenus avec le capteur sur membrane, l'utilisation d'un gaz d'hélium augmente la sensibilité apparente; ce résultat peut s'interpréter en admettant que les phénomènes de conduction entre l'objet à mesurer et la surface sensible contribuent de façon significative à l'élévation de la température des jonctions chaudes lorsque l'on utilise un gaz très conducteur tel que l'hélium.

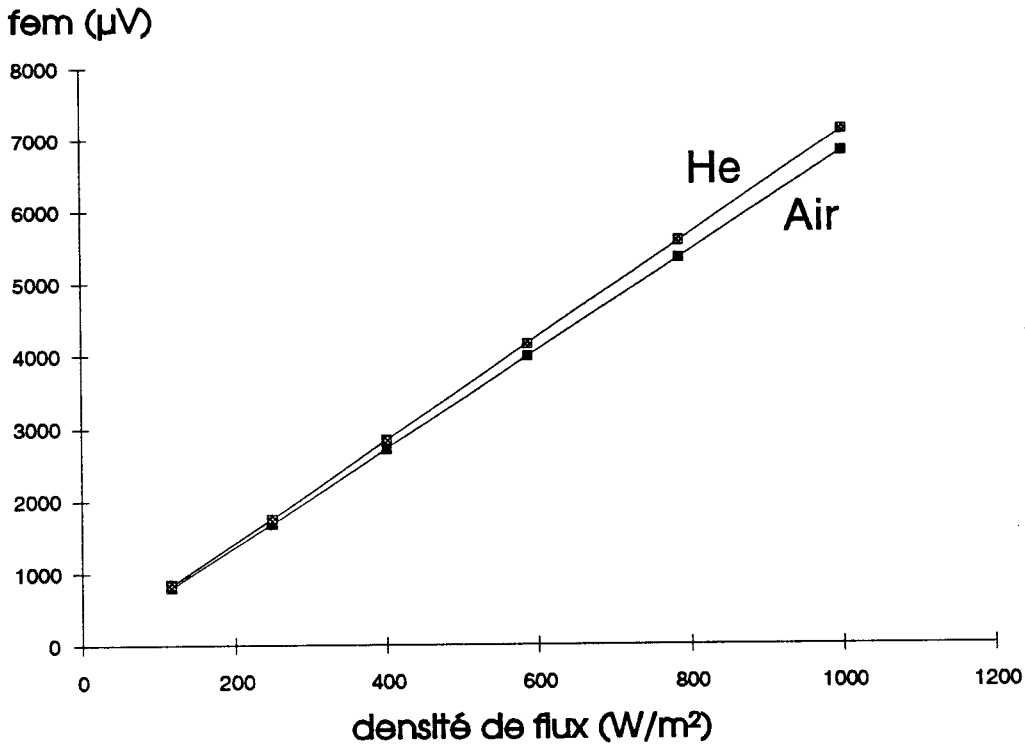
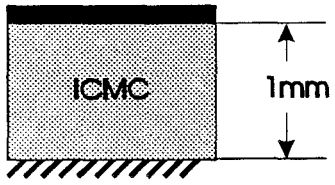
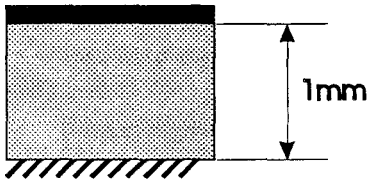
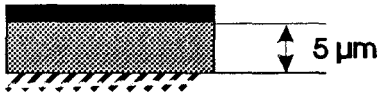
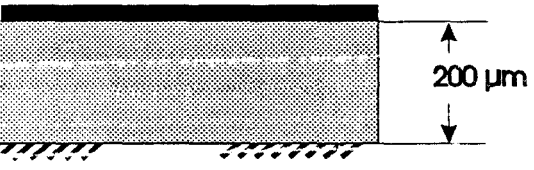
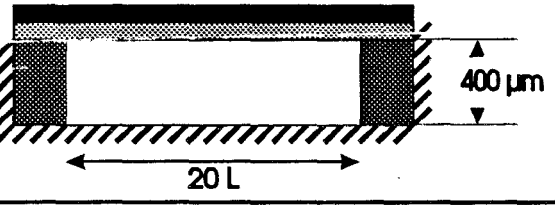
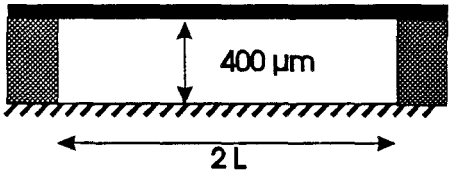


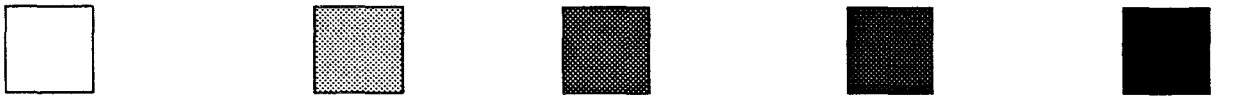
Fig 58 - Evolution de la tension détectée par un capteur en pont en fonction de la densité de flux incident et de la nature de gaz

IV Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous nous sommes efforcés d'étudier tant théoriquement qu'expérimentalement comment il était possible d'augmenter les sensibilités des capteurs sur verre dont les réalisations ont été décrites chapitre II.

C'est ainsi qu'à partir de simulations numériques vérifiées expérimentalement sur un nombre limité de dispositifs non optimisés, il nous a été possible de définir progressivement des structures de performances de plus en plus élevées. Le tableau III 14 résume cette démarche qui nous a permis de définir progressivement les caractéristiques de capteurs qui pourraient être 1000 fois plus sensibles que les dispositifs réalisés dans le cadre de ce travail.

	L	S_φ (µV/W/m²)	S_V (V/W)	S_T (µV/K)	ΔT_{min} (mK)
Résultat expérimental extrapolé à A=1 cm² - l = l = 30µm 	750 µm	6.6	0.066	37.35	7.04
Verre 	1 mm	275.5	2.75	1559.4	5.69
Polyimide 	75 µm	423	4.23	2394.3	3.70
Double face 	2000 µm	1444.4	14.44	8173.4	1.086
membrane 	1200 µm	5670	56.7	32093	0.276
pont 	775 µm	13277	132.77	75151	0.118



A=1cm² l=l=1µm λ_m=10 W/mK

tableau III 14 - Tableau récapitulatif des sensibilités obtenues par simulation numérique pour des différentes structures étudiées et optimisées

Conclusion Générale

Conclusion

Au terme de ce travail, un premier bilan peut être effectué.

Une analyse très complète des propriétés présentées par un nouveau type de capteur proposé par le professeur Théry et ses collaborateurs a tout d'abord été menée à bien. Par rapport aux capteurs classiques, la nouvelle structure proposée est très largement insensible aux phénomènes de conduction et de convection se produisant dans son environnement. Une modélisation analytique originale étayée de simulations numériques a permis non seulement de vérifier cette propriété mais aussi d'optimiser la structure et de montrer les avantages que pourraient apporter l'utilisation de technologies « couche mince » et de lithographie submicronique.

Fort de cette constatation, nous avons procédé aux premières réalisations sur substrat de verre de structures de ce type. Nous avons ainsi pu vérifier les théories élaborées et les premiers capteurs réalisés se sont avérés suffisamment performants pour que l'on puisse procéder à une première industrialisation.

Afin d'élargir le spectre d'application de ces dispositifs, nous avons alors recherché les modifications de structure qui pourraient permettre d'augmenter les performances. Dans ce but, nous nous sommes appuyés non seulement sur la théorie et la modélisation mais aussi sur des réalisations et des caractérisations expérimentales de premiers prototypes. Nous avons ainsi pu montrer qu'en utilisant de nouvelles géométries (lithographie double face, membrane, pont) et/ou de nouveaux matériaux (polyimide, substrat semi conducteur) il devrait être possible de réaliser des capteurs très performants restant malgré tout insensibles aux phénomènes de conduction et de convection se produisant dans l'environnent immédiat.

Il reste maintenant à réaliser les structures optimales que nous avons proposées, mais au delà de cet objectif à moyen terme, de nouvelles pistes sont certainement à explorer. La

structure « symétrique » proposée par notre université (USTL) peut être réalisée facilement en utilisant le semi conducteur (GaAs ou Si) non seulement comme substrat mais aussi comme matériau actif thermoélectrique; de nombreuses possibilités s'ouvrent ainsi et l'utilisation non seulement des propriétés du matériau massif mais aussi peut être celles de gaz d'électrons 2 ou 1 D devrait permettre d'augmenter considérablement le coefficient thermoélectrique. Par ailleurs les géométries utilisées devraient être très voisines de celles de transistors à effet de champ et l'intégration au capteur d'un circuit de traitement d'information peut en être facilitée.

Parallèlement, les études doivent être poursuivies pour mettre en oeuvre leurs très nombreuses applications potentielles en tant que thermométres, fluxmétres, ou encore thermogénérateurs en utilisant les propriétés spécifiques de ces capteurs. Ce sont les principaux objectifs actuels du groupe « capteurs thermiques » de l'IEMN et nous espérons que l'étude que nous avons effectuée et présentée dans ce mémoire constituera une base utile dans l'accomplissement de ces recherches.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Sacadura « Initiation aux transferts thermiques » techniques et documentation - ed 93 - chap 3 - pp 87-181

[2] De Vrien « La transmission de la chaleur » Ed Gaetan Morin, Vol 1, tome 2

[3] Alan J. Chapman « Heat transfer » ed MacMillan, 4ième ed., pp 357-426

[4] E. Gaviot, P. Herin, P. Théry « New thermopiles for measuring convective and radiative heat fluxes on a bare wall » - thermal and temperature measurement in science and industry, pp.1 11,1987

[5] D. Leclercq, P. Razloznik, P. Théry « Thin foil bimetallic printed circuits placed on a wall for simultanéous measuring convective and radiative fluxes » - Instruments for the XXI century, Proceeding pp 181-200, 1988

[6]L. Camberlein, H. Randrianarisoa, P. Godts, P. Thery « Thin planar microthermopiles Application for disigning new prototypes of heat flow sensor and radiation detector » Europhysics Industrial Workshop - Oberhof - April 24-26, 1994

[7] E. Gaviot, P. Théry, D. Leclercq « Designing of a new apparatus for measuring radiative exchanges » - Communication (invité) et publication - 02 au 06 Mai 1993 - 39th International Instrumentation Symposium, New Mexico Albuquerque - U.S.A.

[8] E. Gaviot, P. Godts, S. Guths, and D. Leclercq,« Thin foil planar radiometers: application for designins contactless ΔT sensors » - Meas. Sci. Technol. 7 (1996) 489-494

[9] E. Gaviot, D. Leclercq, F. Raucoules, C. Machut « Un nouveau capteur radiatif appliqué aux mesures de températures sans contact » - Congrés SFT - 1995 - Poitier - 720-725

[10] L. Thiery « Application des microcapteurs thermoélectriques en métrologie opto-optique et en microscopie photothermique » Thèse 3iéme cycle, Franche Comté, 1994

[11] H. Baltes « Microsensors between physics and technology » Physica Scripta, Vol T29, pp 449-453, 1993

[12] F. Volklein, H. Baltes « Optimisation tool for the performance parameters of thermoelectric microsensors » - Sensors and actuators A, Vol 39, pp 65-71, 1993

[13] T. Elbel, R. Lenggenhager, H. Baltes « Model of thermoelectric radiation sensors made by CMOS and micromachining » - Sensors and Actuators A, Vol 35, pp 101-106, 1992

[14] T. Elbel, R. Lenggenhager, H. Baltes « Thermoelectric infrared sensors in CMOS technology » - Sensors and Actuators A, Vol 37-38, pp 216-220, 1993

[15] D. Jaeggi, H. Baltes, D. Moser « Thermoelectric AC power sensor by CMOS technology » - IEEE Electron Devices Letters, Vol 13, No 7, July 1992, pp 366-368

[16] O. Brant, H. Baltes, U. Baldenweg « Thermally excited silicon oxide bridge resonators in CMOS technology » J. Micromech. Microeng., 2 (1992) 208-210

[17] O Paul, H. Baltes « thermal conductivity of CMOS materials for the optimization of microsensors » J. Micromech. Microeng. 3, (1993), 110-112

[18] P. M. Sarro « Integrated silicon thermopile infrared detectors » Ph. D. Thesis, Technical University Delf, NL, 1987

[19] T. Elbel « Miniaturized thermoelectric radiation sensors covering a wide range with respect to sensitivity or time constant » Sensors and Actuators A, 25-27 (1991) pp 653-656

[20] R. Lenggenhager, H. Baltes, J. Peer, M. Forster « Thermoelectric infrared sensors by CMOS technology » IEEE Electron Devices Letters, Vol 13, No 9, Sept 1992, pp 454-456

[21] G. R. Lahiji, K. D. Wise « A batch fabricated silicon thermopile infrared detector » IEEE Transaction on Electron Devices, Vol Ed-29, No1, Janua 1982, pp14-22

[22] Il Hyun Choi, K. D. Wise « A silicon thermopile based infrared sensing array for use in automated manufacturing » IEEE Transaction on Electron Devices, Vol Ed-33, No1, Janua 1986, pp72-79

[23] L. Brunetti, E. Monticone, G. Gervino « Thin film thermopiles in microcolorimeters » Sensors and Actuators A, Vol 25-27, pp 633-636, 1991

[24] D. D. Pollock « Thermocouples, Theory and Properties » - CRC Press - Boca Raton, Fl, 1991

[25] E. Bales, A. Bombey, « Building applications of heat flux transducers » - Ed G. E. Courville, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985

[26] F. Völkein, A. Wiegand, V. Baier, « High-sensitivity radiation thermopiles made of Bi-Sb-Te films » - Sensors and Actuators A, 29 (1991) pp87-91, 1991

[27] R. Lenggenhager, H. Baltes, J. Peer, M. Forster, « Thermoelectric Infrared Sensors by CMOS technology », IEEE Electron device letters, vol 13, N°9, 1992

[28] D. M. Rowe, « CRC Handbook of Thermoelectrics », CRC Press, London, 1995

[29] E. Gaviot « Etude des capteurs de flux thermique à gradient tangentiel. Modélisation et théorie menant aux microstructures », Habilitation à diriger des recherches, Université de Lille, juillet 1997

[30] H. S. Carlaw & Jaeger « Conduction of heat in solids », pp 18-23, 2nd Ed., Clarendon Press, Oxford, 1995

[31] Hiriart-Urruty J.-B., « Conditions for global optimality » in Handbook of global optimization, Kluwer, 1995

[32]J. Hladik « Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux » ed Masson, pp210-221

[33] Sacadura « Initiation aux transferts thermiques » techniques et documentation - ed 93 - chap 3 - pp 144 146

[34] M. Stordeur « The thermoelectric figure of merit in the mixed crystal system p-(Bi_{1-x} Sb_x)$2Te_3$ » Phys. Stat. Sol. (b) 161,831 (1990)

[35] Ph. Herin, P. Thery « Measurement on the thermoelectric properties of thin bimetallic films » Meas. Sci. Technol. , 3 pp495-500, 1992

[36] A. W. Van Herwaarden, P. M. Sarro « Thermal sensors based on the seebeck effect » Sensors and Actuators, 10 (1986), pp 321-346

[37] D. M. Rowe, M. C. Bhandari « Preparation and thermal conductivity of doped semiconductors » Prog. Crystal Growth and Characterization, 13 (1986), pp254-257

[38] A. Moliton, J.L. Duroux, B. Bartier « Coefficient Seebeck et mécanismes de conduction dans les polymères PPP Electroactifs dopé par implantation ionique », journal of plymer science: Part B: Polym. Physics, Vol.28, pp 17-33, 1990

[39] Sacadura « Initiation aux transferts thermiques » techniques et documentation - ed 93 - chap 4 - pp185-269

[40]De Vrien« La transmission de la chaleur » Ed Gaetan Morin, Vol 1, tome 1, pp 20-28

[41] D Leclercq and P Thery « Utilization of the Peltier effect for accurate measurement of a fluide property, Application for designing new sensors » Meas. Sci. Technol. , 4 158-5, 1993

[42] E. Gaviot, D. Leclercq, F. Raucoules, and P. Thery, « Design of a new thermoelectric massflow rate sensor », 40th International Instrumentation Symposium, Instrument Society of America, Baltimore, MD, 1994

[43] S. Güths, D. Leclercq and E. Gaviot, « A new sensor to measure fluids velocities: The Peltier anemometer » Meas. Sci. Technol., 4 158-5, 1997

[44] P. Godts, C. Machut, L. Camberlein, D Leclercq « Peltier effect for measurement of fluid thermal property- Application for designing new thermal sensors » Sensors and Materials, Vol. 8, No 5 (1996) 293-301

[45] D. Moser « CMOS flow sensors » Thèse de doctorat, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1993

[46] D. Moser, H. Baltes « A high sensitivity CMOS gas flow sensor on a thin dielectric membrane » Sensor and actuators A, 37-38, (1993), 33-37

[47] S. Bouwsta, P. Kemna and R. Legtenberg, « Thermally excited resonning membrane mass flow sensor » Sensors and Actuators, 20 (1989) pp213-223

[48] D. Moser, R. Lenggenhager, G. Wachutka, H. Baltes « Fabrication and modelling of CMOS microbridge gas-flow sensors » Sensors and Actuators B, 6 (1992) 165-169

[49] Alan J. Chapman « Heat transfer » ed MacMillan, 4ième ed., pp 35-124

[50]J. Hladik « Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux » ed Masson, pp111-121

[51] P. Krummenacher, H. Oguey « Smart temperature sensors in CMOS technology » Sensors and Actuators A, 21-23 (1990), pp636-638

[52] Raldi Artono Koestoer, « Zero method heat flux sensor » Sensor and Actuators, Vol 7, pp 145-151, 1985

[53] P. Godts, P. Thery « Micro capteurs de flux thermiques sans contact en technologie de couche mince planar » Astelab 95, 1995

[54] F. Polet « Conception et réalisation d'un thermométre sans contact à compensation automatique de l'émissivité » DEA Electronique - Juillet 1994

[55] E. Gaviot, C. Machut, S. Sackly, K. Ziouche, « A new planar microradiometer fitted for radiant panel enhanced control », International Sensor 97 proceedings, Nuremberg, 1997

[56] Alan J. Chapman « Heat transfer » ed MacMillan, 4ième ed., pp 225-275

[57] Manuel de Thermiq

[58] Rapport interne E. Gaviot, B. Verbeke, F. Raucoules.

[59] Gilbert Gaussorgeres « La thermographie infrarouge » - Technique et documentation - p123

LISTE DES FIGURES

figure 1 - Schéma d'un capteur thermique classique

figure 2a - Association en série de cellules du capteur USTL

figure 2b - Structure d'une cellule du capteur USTL

figure 3 - Schéma d'une cellule du capteur USTL réalisée en couche mince

figure 4 - Vue de dessus d'un capteur USTL

figure 5 - Schéma équivalent en terme de résistance thermique de l'ensemble des jonctions

figure 6 - Réseau de résistances et de puissance IR caractérisant le capteur de l'USTL

figure 7 - Schéma du réseau de résistances incluant les effets convectifs

figure 8 - Schéma du réseau de résistances incluant les effets conductifs

figure 9 - Schéma des réseaux de résistances des capteurs conventionnels et USTL

figure 10 - Structure générale d'un capteur

figure 11 - Structure d'une cellule

figure 12 - Structure d'une demi cellule

figure 13 - Evolution thermique d'une cellule élémentaire

figure 14 - Evolution thermique due à la mise en parallèle de plusieurs cellules élémentaires

figure 15 - cellule utilisée dans la simulation

figure 16 - Demi cellule pour étude numérique

figure 17 - Cartes de température obtenues par simulation numérique pour différentes longueurs de demi cellule et pour des conductivités thermiques de surface différentes pour une épaisseur de verre de 1mm

figure 18 - Evolution de la température en fonction de x pour un substrat de verre de 1mm d'épaisseur une demi cellule de 500µm pour un $\varphi_{incident}$ =1W/m²

figure 19 - Evolution de la température (en %) entre les jonctions en fonction de la longueur de la zone absorbante (l_C) et de la longueur de la zone réfléchissante (l_f) et de l'épaisseur de verre (λ=1) pour L=1mm et λ_m=40

figure 20 - Résultats analytiques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de l'épaisseur de substrat e_V, pour une conductivité thermique de substrat λ de 1 W/mK et une conductivité thermique de surface λ_m=1W/mK

figure 21 - Résultats numériques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de l'épaisseur de substrat e_V, pour une conductivité thermique de substrat λ de 1 W/mK et une conductivité thermique de surface λ_m=1W/mK

figure 22 - Résultats analytiques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de l'épaisseur de substrat e_V, pour une conductivité thermique de substrat λ de 1 W/mK et une conductivité thermique de surface λ_m=40W/mK

figure 23 - Résultats analytiques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de l'épaisseur de substrat e_V, pour une conductivité thermique de substrat λ de 1 W/mK et une conductivité thermique de surface λ_m=40W/mK

figure 24 - Résultats analytiques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique de surface λ_m, pour une épaisseur de substrat de verre e_V =400µm

figure 25 - Résultats numériques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique de surface λ_m, pour une épaisseur de substrat de verre e_V =400µm

figure 26 - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique de surface λ_m, pour une épaisseur de substrat de verre e_V =400µm avec différents modes de calcul: numérique et analytique

figure 27 - Résultats analytiques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique du substrat λ pour une épaisseur de substrat de 400µm et de la conductivité thermique surface λ_m=1W/mK

figure 28 - Résultats numériques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique du substrat λ pour une épaisseur de substrat de 400µm et de la conductivité thermique surface λ_m=1W/mK

figure 29 - Résultats analytiques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique du substrat λ pour une épaisseur de substrat de 400µm et de la conductivité thermique surface λ_m=40W/mK

figure 30 - Résultats numériques - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de la longueur de demi cellule L et de la conductivité thermique du substrat λ pour une épaisseur de substrat de 400µm et de la conductivité thermique surface λ_m=40W/mK

figure 31 - Résultats numériques - Evolution de la différence de température entre T_1 et T_2 pour un substrat de verre de 400µm d'épaisseur et une longueur de demi cellule de 800µm

figure 32 - Réalisation des capteurs sur kapton

figure 33 - Photos de réalisation de capteur en kapton standard (a) et kapton noir (b)

figure 34 - Réalisation des capteurs sur verre

figure 35a - Constantan non recuit

figure 35b - Constantan recuit

figure 36 - Evolution de la résistivité du constantan en fonction de la température de recuit

figure 37 - Configuration expérimentale utilisée pour mesurer la sensibilité du capteur

figure 38 - Evolution de la FEM aux bornes du capteur en fonction de la densité de flux incident

figure 39 - Spectre de transmission de l'infrarouge à travers un verre de 1mm d'épaisseur

figure 40 - Variation de la conductivité thermique de surface en faisant varier la largeur de piste d'or

figure 41 - Photos de réalisation en couches minces

figure 42 - Evolution de la sensibilité $S\varphi$ en fonction de l'épaisseur de verre - Courbes expérimentales et théoriques

figure 43 - Evolution de la tension détectée en fonction de la densité de flux radiatif incident et de la nature du gaz environnant

figure 44 - Evolution de la sensibilité $S\varphi$ en fonction du débit d'air

figure 45 - Evolution du rapport $\Delta T/L$ pour une structure en verre classique et un substrat de verre recouvert d'une couche de polyimide pour un $\lambda_m = 10$

figure 46 - FEM détectée en fonction de la densité de flux incident pour un substrat de verre de 170µm placé directement sur un puits thermique et sur une lamelle d'époxy

figure 47 - Evolution de rapport $\Delta T/L$ pour une structure en polyimide déposée directement sur un puits thermique ($\lambda_m = 10$)

figure 48 - Structure avec puits thermique supprimé sous la jonction chaude

figure 49 - Comparaison de l'évolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de L pour des structures avec puits thermique uniforme et supprimés

figure 50 - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de L pour une structure avec puits thermique supprimé en fonction de la convection

figure 51 - Evolution du rapport $\Delta T/L$ en fonction de L pour un capteur en membrane polyimide

figure 52 - Réalisation de capteur sur membrane

figure 53 - Réalisation de capteur sur membrane sur GaAs. Vue de derrière

figure 54 - Différentes géométries utilisées pour le calcul numérique

figure 55 - Evolution de la tension détectée par un capteur sur membrane en fonction de la densité de flux incident et de la nature du gaz

figure 56 - Réalisation d'un capteur en pont

figure 57 - Structure simulée numériquement

figure 58 - Evolution de la tension détectée par un capteur en pont en fonction de la densité de flux incident et de la nature du gaz

TABLEAUX

tableau I 1 - Caractéristiques géométriques

tableau I 2 - Performances expérimentales

tableau I 3 - Performances prévues par simulation numérique en admettant une absorption complète sur toute la surface (ε =1) et les valeurs d'émissivité obtenues par comparaison avec les valeurs des sensibilités expérimentales

tableau I 4 - Performances prévues expérimentales et analytiques de la précision ultime

tableau II 1 - Caractéristiques géométriques

tableau II 2- Comparaison des valeurs expérimentales et numériques pour une absorption sur toute la surface de réception (η=1)

tableau II 3 - Différentes émissivités caractérisant la surface du capteur à partir des valeurs obtenues théoriquement et expérimentalement

tableau II 4 - Différentes émissivités caractérisant la surface du capteur 3 à partir des valeurs obtenues théoriquement et expérimentalement

tableau II 5 - Caractéristiques géométriques

tableau II 6 - Comparaison des valeurs expérimentales et numériques pour une absorption sur toute la surface de réception (η=1)

tableau II 7 - Différentes émissivités caractérisant la surface du capteur à partir des valeurs obtenues théoriquement et expérimentalement

tableau II 8 - Caractéristiques géométriques

tableau II 9 - Comparaison des valeurs expérimentales et numériques pour une absorption sur toute la surface de réception (η=1)

tableau II 10 - Différentes émissivités caractérisant la surface du capteur à partir des valeurs obtenues théoriquement et expérimentalement

tableau III 1 - Comparaison entre le capteur de type 3 et les calculs optimisés des différentes sensibilités pour un capteur sur verre de 1 mm d'épais et une surface de 9 mm²

tableau III 2 - Evolution du rapport $\varepsilon_T \Delta T/L$ en fonction de l'épaisseur de nitrure de silicium (a représente le coefficient de réflexion d'une couche de nitrure de silicium sans tenir compte du dioptre d'entrée; ε_2 # 0.9(1-a))

tableau III 3 - Evolution du rapport $\varepsilon_T \Delta T/L$ en fonction de l'épaisseur de silice (x_1=50%, x_2=50%) pour une surface de 9mm² (même notation que dans le tableau III 2)

tableau III 4 - Comparaison des résultats optimums en fonction de l'isolant pour une surface de 9mm²

tableau III 5 - Performances théoriques du capteur réalisé sur une couche de polyimide

tableau III 6 - Performances théoriques du capteur réalisé en supprimant une partie du puits thermique

tableau III 7 - Performances théoriques du capteur réalisé sur membrane de polyimide

tableau III 8 - Performances théoriques et expérimentales du capteur réalisé sur un substrat semi conducteur de GaAs

tableau III 9 - Performances expérimentales du capteur réalisé sur membrane de polyimide

tableau III 10 - Performances expérimentales et numériques du capteur réalisé en membrane

tableau III 11 - Caractéristiques et performances expérimentales du capteur en pont

tableau III 12 - Caractéristiques et performances numérique du capteur en pont

tableau III 13 - Valeurs théoriques pour un capteur en pont optimisé

tableau III 14 - Tableau récapitulatif des différentes sensibilités en fonction de la structure

Résumé

La technologie développée dans le domaine de la micro-électronique permet la miniaturisation et l'intégration de nombreuses fonctions dans un volume. Le travail qui nous a été confié consistait à utiliser ces technologies pour réaliser un nouveaux type de capteur de température basé sur la mesure du flux émis par l'objet étudié. L'objectif était d'améliorer les performances de dispositifs réalisés antérieurement par le collage sur support kapton.

En reprenant l'étude de la physique de ces capteurs, basée sur la thermoélectricité, nous avons conçu et réalisé une version miniaturisée déposée sur verre. Les techniques de dépôt de la micro-électronique ont permis l'obtention d'une nouvelle thermopile bimétallique dont la sensibilité au rayonnement IR ($\mu V/(W/m^2)$)est notablement améliorée. Compte tenu de la reproductibilité de la méthode, de nombreuses applications industrielles peuvent être envisagées; détection de présence, mesure de température à distance, contrôle des systèmes de séchage industriel.

La physique du capteur est présentée dans une première partie. Les paramètres dimensionnels sont étudiés et optimisés par modélisation afin de minimiser les transferts thermiques entre zones chaudes et froides et de réaliser une structure symétrique ou les effets de conduction et de convection extérieurs au capteur sont rendus aussi faibles que possible.

La technologie de fabrication est ensuite détaillée. L'utilisation d'un substrat de verre permet fonctionnement jusqu'à 300°C. A l'issue de ce travail, le procédé de réalisation à été transféré vers la société ICMC.

A partir de modélisations et de premières réalisations de prototypes, une étude plus prospective est alors effectuée afin de rechercher les structures permettant d'accroître plus largement les performances. Utilisés dans ce but et à partir des structures à base de semi-conducteurs, de ponts, de poutres et de membranes on montre qu'il devrait être possible d'augmenter considérablement les sensibilités.

Mots clés

Thermoélectricité - Thermopile - Capteur de température - Flux radiatif - Conduction thermique - Convection

UNIVERSITÉ DES SC. ET TECHN. BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE LILLE I