

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Traitement de l'Information et Systèmes Électroniques

présenté par

Noukha Ouafia

&

Boudjelal Fatima zohra

Etude Analytique et Simulation Sous Matlab d'un Micro-Capteur

Proposé par : Mr. BOUNEMRI Ammar

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier ALLAH le Tout Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour pouvoir réaliser ce travail. Nous exprimons notre cordiale reconnaissance à notre encadreur Mr. Ammar BOUNEMRI pour ses précieux conseils, sa rigueur et patience et toutes les connaissances qu'il nous a transmises.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et nous remercions au membre de jury - veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance.

Nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études, plus généralement tout le personnel enseignants du département d'électronique de l'université de Blida 1 qui a participé à notre formation.

Finalement , nous adressons les plus vifs remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin dans l'élaboration de ce modeste mémoire.

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut....

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que je dédie ce travail

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments le plus pénibles de ce long chemin

A mon mari pour son soutien moral et pour sa présence dans ma vie

A mes chers enfants {Fichem, Nesrine et Hanane} qui m'ont vivement encouragé

A mes chers frères et sœurs et leurs adorables enfants

A toutes ma famille sans exception

*A notre cher promoteur Mr **Ammar BOUNEMRI** nous sommes très honorés de vous avoir comme promoteur de notre thèse*

A tous mes amis mes collègues de travail et spécialement ma chère binôme

A toute la promotion 2020 et le département de l'électronique

Je remercie enfin tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail et tous ceux qui me connaissent.

Ouafia

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut....

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que je dédie ce travail

A mon très cher « papa » qui m'a guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin

A mon mari pour son soutien moral et pour sa présence dans ma vie

A mes chers enfants { Amira , Malak et Imene } qui m'ont vivement encouragé

A mes chers frères et sœurs et leurs adorables enfants

A toutes ma famille sans exception

*A notre cher promoteur M^{er} **Ammar BOUNEMERI** nous sommes très honorés de vous avoir comme promoteur de notre thèse*

A tous mes amis mes collègues de travail et spécialement ma chère binôme

A toute la promotion 2020 et le département de l'électronique

Je remercie enfin tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail et tous ceux qui me connaissent.

Fatima zohra

ملخص:

يهدف العمل المنجز في هذه الأطروحة إلى دراسة هيكل أبعاده ميكرومتر يمثل مستشعر الغاز. الهيدروجين هو الغاز الذي يتم التقاطه. تستند الدراسة إلى نهج تحليلي يسمح بطرح معادلات انتقال الحرارة التي تحدد سلوك المستشعر، في وجود الغاز الملتقط. ثم يتم محاكاة هذه المعادلات باستخدام برنامج Matlab. يتم الحصول على نتائج محاكاة مختلفة لتحديد قيمة قصوى لحساسية المستشعر. ثم يتم استنتاج الأبعاد للهيكल الأمثل.

كلمات المفاتيح: توصيل الحرارة، عمود الحرارة، Seebeck، حساسية

Résumé :

Le travail fait dans ce mémoire a pour objectif l'étude d'une microstructure représentant un capteur de gaz. L'hydrogène est le gaz a capté. L'étude est basée sur une approche analytique permettant de développer les équations de transfert de chaleur qui définissent le comportement du capteur, en présence du gaz a capté. Ces équations sont ensuite simulées avec le logiciel Matlab. Différents résultats de simulation sont obtenus pour établir une valeur maximum de la sensibilité du capteur. Une structure optimale, en dimensions, est ensuite déduite.

Mots clés : Conduction de chaleur, Thermopile, Seebeck, Sensibilité.

Abstract :

The work done in this thesis aims to study a microstructure representing a gas sensor. Hydrogen is the gas captured. The study has been done, based on an analytical approach allowing the development of heat transfer equations that define the behavior of the sensor, in the presence of the captured gas. These equations are simulated with the Matlab software. Different simulation results are obtained to establish a maximum value of the sensitivity of the sensor. An optimal structure, in dimensions, is then deduced.

Keywords : Heat conduction, Thermopile, Seebeck, Sensitivity

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre 1 : Classification des capteurs de gaz | 2 |
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.2 Capteurs de gaz à conductivité thermique..... | 3 |
| 1.3 Connaissances de base sur le transfert de chaleur et la thermopile..... | 4 |
| 1.3.1 Transfert de chaleur..... | 4 |
| 1.3.2 Thermopile, thermocouples et effet Seebec | 5 |
| 1.4 Principe de base des capteurs de gaz à conductivité thermique | 6 |
| 1.5 Mesure de température..... | 7 |
| 1.6 Sensibilité du capteur..... | 8 |
| 1.7 Etat de l'art des capteurs de gaz | 8 |
| 1.7.1 Capteurs de gaz chimiques à base de métal sensibles aux gaz | 8 |
| 1.7.2 Capteurs de gaz par conductivité thermique | 10 |
| Conclusion | 12 |
| Chapitre 2 : Etude du capteur basée sur une approche analytique | 14 |
| 2.1 Introduction | 15 |
| 2.2 Principe détaillé des capteurs de conductivité thermique | 15 |
| 2.3 Processus de fabrication | 16 |
| 2.3.1 Processus de micro-usinage de surface | 16 |
| 2.3.2 Conception des éléments de capteur | 16 |
| 2.4 Modélisation thermique | 17 |
| 2.4.1 Prérequis | 18 |
| 2.4.2 Modèle thermique du capteur | 19 |
| 2.4.2.1 Rayonnement thermique et conduction thermique sur la résistance | 20 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.2.2 Flux de chaleur à travers l'interface | 21 |
| 2.4.2.3 Rayonnement thermique et conduction thermique sur la poutre | 22 |
| 2.4.2.4 L'équation thermique différentielle du second degré de la poutre | 22 |
| 2.4.2.5 Conditions aux limites | 23 |
| 2.4.2.6 Calcul de Tr | 25 |
| 2.4.3 Sensibilité | 26 |
| 2.4.3.1 Sensibilité à la conductivité thermique | 26 |
| 2.4.3.2 Sensibilité à la concentration de gaz mesurée | 27 |
| Conclusion | 29 |
| Chapitre 3 : Simulation sous logiciel Matlab du capteur de gaz | 30 |
| 3.1 Introduction | 31 |
| 3.2 Paramètres de simulation | 31 |
| 3.3 Simulation de la sensibilité du capteur en fonction de la puissance d'entrée | 32 |
| 3.4 Simulation de la tension Seebeck du capteur en fonction de la puissance d'entrée | 35 |
| 3.5 Simulation de la sensibilité du capteur en fonction du parcours du gaz selon l'axe z | 37 |
| 3.6 Simulation de la sensibilité du capteur en fonction de la longueur de la poutre pour différents parcours du gaz selon l'axe z | 38 |
| 3.7 Obtention de la structure optimale | 39 |
| Conclusion | 41 |
| Conclusion générale | 42 |
| Références | 43 |

Liste des figures

Figure 1.1 : Illustration de l'effet Seebeck

Figure 1.2 : Illustration d'une thermopile

Figure 1.3 : Illustration du principe simplifié du capteur de gaz à conductivité thermique

Figure 1.4 : Schéma et principe de détection du capteur de gaz micro-thermoélectrique
(a) vue conceptuelle.
(b) principe de la méthode d'auto-compensation utilisant la thermopile de référence pour réduire le bruit thermique externe.

Figure 1.5 : Réchauffeur central (résistance) et jonctions chaudes des thermopiles dans le TCG-3880

Figure 1.6 : Capteur thermoélectrique micro-usiné

Figure 1.7 : Coupe transversale d'un capteur thermoélectrique micro-usiné

Figure 2.1 : Principe du capteur de gaz par conductivité thermique

Figure 2.2 : Principe du capteur de gaz par conductivité thermique

Figure 2.3 : distribution tridimensionnelle de température du capteur à gaz

Figure 2.4 : Vue de dessus du schéma du capteur avec la résistance de $x=0$ à $x=L_R$ et le faisceau de $x=L_R$ à $x=L_B$.

Figure 3.1 : Sensibilité du capteur en fonction de la puissance d'entrée, pour différentes concentrations du gaz hydrogène

Figure 3.2 : Gamme d'erreur de la variation de la sensibilité
a/ pour une puissance d'entrée de 0 à 0.6 mW
b/ pour une puissance d'entrée de 0 à 2 mW

Figure 3.3 : Variations de la tension Seebeck en fonction de la concentration du gaz hydrogène dans l'air et pour différentes valeurs de la puissance d'entrée

Figure 3.4 : Variation de la tension Seebeck en fonction de la concentration du gaz hydrogène pour une puissance en entrée fixée

Figure 3.5 : Variation de la tension Seebeck en fonction de la concentration du gaz hydrogène pour une puissance en entrée fixée de 0.1 à 0.6 mW

Figure 3.6 : Variation de la sensibilité du capteur en fonction du parcours de gaz selon l'axe z, pour une longueur de poutre fixée à 100 μm

Figure 3.7 : Variation de la sensibilité en fonction de la distance de parcours de gaz pour différentes longueurs de poutres

Figure 3.8 : Simulation de la sensibilité du capteur en fonction de la longueur de la poutre pour différents parcours du gaz selon l'axe z

Figure 3.9 : Sensibilité en fonction de la longueur de poutre et de la longueur du parcours de gaz

Figure 3.10 : Sensibilité en fonction de la longueur de poutre et de la longueur du parcours de gaz pour la thermopile formée de matériaux semi-conducteurs.

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Paramètres à valeurs constantes, utilisés lors de la simulation

Tableau 3.2 : a/ Coefficients Seebeck pour les thermocouples standard
b/ Coefficients de Seebeck pour certains métaux et alliages, par rapport au platine
c/ Coefficients de Seebeck pour certains semi-conducteurs

Introduction générale

Les capteurs de gaz sont les dispositifs qui détectent la présence d'une fuite de gaz cible. Ces dernières années, les capteurs de gaz sont de plus en plus utilisés sur les marchés en croissance rapide des systèmes d'application de sécurité, en particulier pour la détection d'hydrogène dans les applications industriels (combustion automobile, piles à combustible, etc...)[1,2]. Dans de tels systèmes, une fuite d'hydrogène gazeux doit être détectée avant que l'hydrogène ne forme un mélange explosif facilement inflammable avec l'air ambiant lorsque la concentration d'hydrogène atteint la limite inférieure d'explosivité (LIE) qui est de 4 %[3] dans l'air. Par conséquent, les capteurs de gaz à temps de réponse rapide, à faible coût et à faible consommation d'énergie sont très demandés pour la détection d'hydrogène dans les applications de sécurité. De nos jours et en se basant sur le développement technologique établi dans la microélectronique, le dimensionnement micrométrique de tels capteurs est devenu possible. La technologie MEMS (Micro Electro Mecanical Systems)[4], à base de silicium a non seulement rendu possible la fabrication de capteurs de gaz miniaturisés à faible coût, mais a également fourni des capteurs de gaz haute performance qui combinent des fonctionnalités électriques et thermiques dans un seul morceau de silicium. Ces capteurs de gaz miniatures MEMS sont de plusieurs ordres de grandeur plus petits que les capteurs de gaz conventionnels, tandis que leur consommation d'énergie, leur temps de réponse et leurs coûts de production sont considérablement réduits [5].

Dans le cadre de ce mémoire une étude analytique portant sur un capteur de gaz hydrogène est faite. L'organisation de ce mémoire est établie comme suit :

- Le chapitre 1, présentera d'abord les avantages de l'utilisation d'un capteur de gaz physique au lieu d'un capteur de gaz chimique. Le capteur de gaz à conductivité thermique étant un capteur physique, son principe sera détaillé. Plusieurs capteurs de gaz avancés et représentatifs seront décrits et comparés.
- Le chapitre 2, l'étude du capteur de gaz à conductivité thermique basée sur une approche analytique est détaillée. Un ensemble d'équations dans le domaine du transfert de chaleur sont établies. Ces équations définissent le comportement thermique du capteur et son utilité dans la détection du gaz hydrogène.
- Le chapitre 3, la simulation, sous logiciel Matlab, des équations établies en chapitre 2 est faite. Les résultats de cette simulation nous permettent d'avoir la structure optimale du capteur.
- Une conclusion générale termine ce mémoire.

Chapitre 1 :

Classification des capteurs de gaz

Chapitre 1 Classification des capteurs de gaz

1.1 Introduction

Il existe deux approches fondamentalement différentes pour le capteur de gaz :

Le capteur chimique et le capteur physique.

La détection de gaz chimique est basée sur la mesure d'un changement de conductance électrique ou d'autres propriétés physiques du matériau de détection en raison de l'interaction chimique entre le gaz et le matériau de détection.

Il y a un problème majeur dans les capteurs de gaz chimiques : la stabilité à long terme est limitée en raison de la contamination de l'interface lors de l'interaction chimique [5,6,7].

Un autre inconvénient majeur des capteurs chimiques est la lenteur du temps de réponse en raison de leur interaction chimique qui dépend fortement de la température ambiante.

Par exemple, les capteurs chimiques à base de palladium (Pd) sont couramment utilisés pour la détection d'hydrogène car le Pd a une sensibilité et une sélectivité élevées vis-à-vis de l'hydrogène [3, 8, 9, 10, 11]. Cependant, les capteurs de gaz à base de Pd ont souvent un temps de réponse très lent à basses températures en raison de leur forte dépendance à la température, de plusieurs centaines de secondes à plusieurs minutes [3, 12, 13, 14] lorsqu'ils détectent un changement de 1% de la concentration d'hydrogène dans l'air.

Par conséquent, le capteur de gaz physique qui repose sur la mesure directe d'une propriété physique d'un gaz mesuré est meilleur, car il offre des possibilités pour une stabilité à long terme améliorée et un temps de réponse rapide. Pour cela, le capteur de conductivité thermique, présente une bonne solution. Bien que les capteurs de conductivité thermique ne soient généralement pas aussi sélectifs ou sensibles que les capteurs de gaz chimiques [5], ils sont plus rapides et plus fiables car ils ne seront pas dépendants de la température ou contaminés lorsqu'ils détectent les gaz.

1.2 Capteurs de gaz à conductivité thermique

Les capteurs de conductivité thermique sont particulièrement adaptés à la détection d'hydrogène, car la conductivité thermique de l'hydrogène (0.1805 W /K.m [15]) est environ 7,5 fois celle de l'air (0.02394 W/K.m [16]). Cela indique que même une très faible concentration de fuite d'hydrogène dans l'air peut être détectée en raison de l'augmentation notable de la conductivité thermique du gaz. Par conséquent, les capteurs de gaz à conductivité thermique sont particulièrement adaptés à la détection de fuite d'hydrogène avant que les concentrations d'hydrogène n'atteignent la limite inférieure d'explosivité (LIE) qui est de 4% dans l'air dans les applications de sécurité.

1.3 Connaissances de base sur le transfert de chaleur et la thermopile

1.3.1 Transfert de chaleur

Le transfert de chaleur est la transition de l'énergie thermique d'un matériau à une température élevée à un matériau à une température plus basse [17, 18, 19]. Il existe trois modes de transfert de chaleur : la conduction thermique, la convection et le rayonnement.

a/ La conduction thermique

La conduction thermique est l'un des moyens les plus importants de transfert de chaleur dans une structure à micro-échelle. Par définition, la conduction thermique est le flux d'énergie thermique de la région à haute température vers la région à basse température [18]. Par exemple, une cuillère métallique placée dans de l'eau chaude peut rapidement conduire la chaleur, à travers la cuillère, jusqu'à la main de la personne qui la tient à l'autre bout.

La conduction thermique H peut être définie comme [20]:

$$H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda A \frac{\Delta T}{x} \quad [\text{W}] \quad (1.1)$$

Où $\Delta Q / \Delta t$ est le taux de flux de chaleur, λ la conductivité thermique, A la section transversale totale de la surface conductrice, ΔT la différence de température et x l'épaisseur de la surface conductrice séparant les deux températures [20].

b/ La conductivité thermique

La conductivité thermique est la propriété d'un matériau, elle indique sa capacité à conduire la chaleur. La conductivité thermique est mesurée en watts par Kelvin-mètre (W/K.m)

En réorganisant l'équation ci-dessus, on aura l'expression de la conductivité thermique comme suit :

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{x}{\Delta T} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad (1.2)$$

Ce qui signifie que la conductivité thermique peut être considérée comme un flux de chaleur ($\Delta Q / A \cdot \Delta t$) divisé par un gradient de température ($\Delta T / x$).

c/ La conductance thermique

La conductance thermique est la quantité de chaleur qui passe en unité de temps à travers une plaque de surface et d'épaisseur particulières lorsque ses faces opposées diffèrent en température d'un kelvin, ce qui est donné par :

$$G = \frac{\lambda A}{x} \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right] \quad (1.3)$$

Où λ est la conductivité thermique, A la surface de la plaque et x l'épaisseur de la plaque.

1.3.2 Thermopile, thermocouples et effet Seebeck

Une thermopile (figure I.2) est un dispositif électronique qui convertit l'énergie thermique en énergie électrique. Il est composé de thermocouples connectés en série.

Un thermocouple (figure I.1) est une jonction entre deux métaux différents qui produit une tension électrique due à une différence de température entre les deux métaux.

Les thermopiles ne mesurent pas la température absolue, mais génèrent une tension de sortie proportionnelle à une différence de température locale ou à un gradient de température.

L'effet Seebeck est la conversion directe des différences de température en électricité.

L'effet est qu'une tension est créée en présence d'une différence de température entre deux métaux ou semi-conducteurs différents [21].

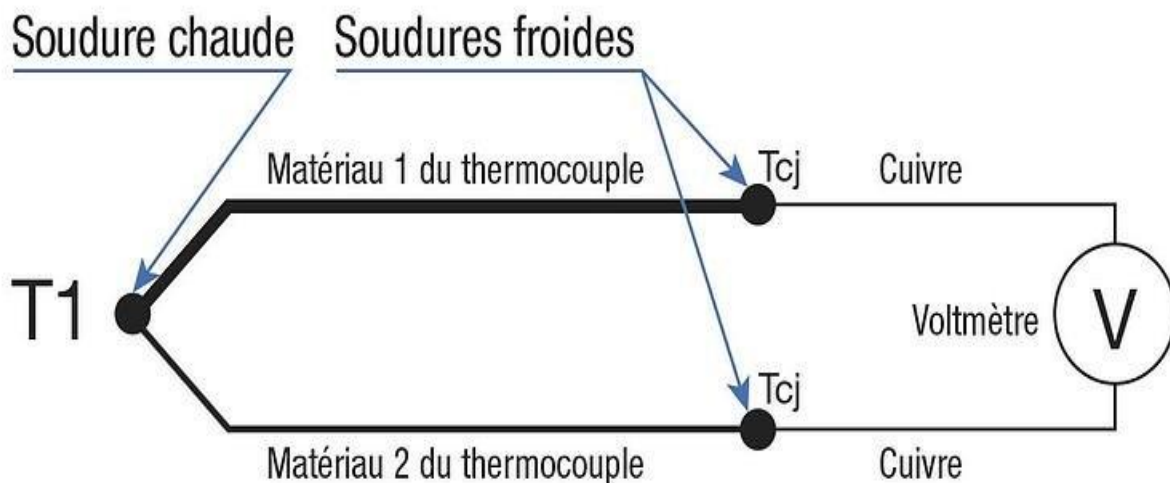


Figure 1.1 : Illustration de l'effet Seebeck

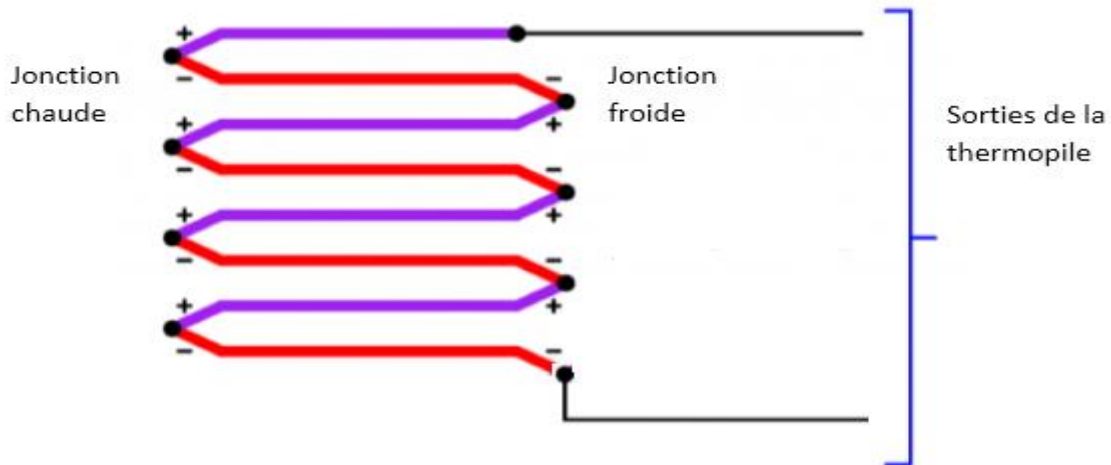


Figure 1.2 : Illustration d'une thermopile

La figure 1.1 présente un thermocouple composé de deux matériaux différents 1 et 2. Une tension de circuit ouvert V est générée lorsque le potentiel thermique sur la jonction est supérieur à celui de l'extrémité ouverte.

La proportionnalité entre la tension de sortie et la différence de température appliquée ΔT est définie comme le coefficient Seebeck α_T . Le coefficient Seebeck est une constante de matériau dépendant de la température indiquant la tension thermoélectrique générée par le thermocouple pour une différence de température appliquée entre la jonction chaude et la jonction froide[22] :

$$V = \alpha_T \cdot \Delta T \text{ [V]} \quad (1.4)$$

tel que $\alpha_T = \text{Coefficient Seebeck}_+ - \text{Coefficient Seebeck}_-$

1.4 Principe de base des capteurs de gaz à conductivité thermique

Comme illustrée sur la figure 1.3, les capteurs de gaz à conductivité thermique effectuent une mesure de la conductivité thermique du gaz mesurande comme suit :

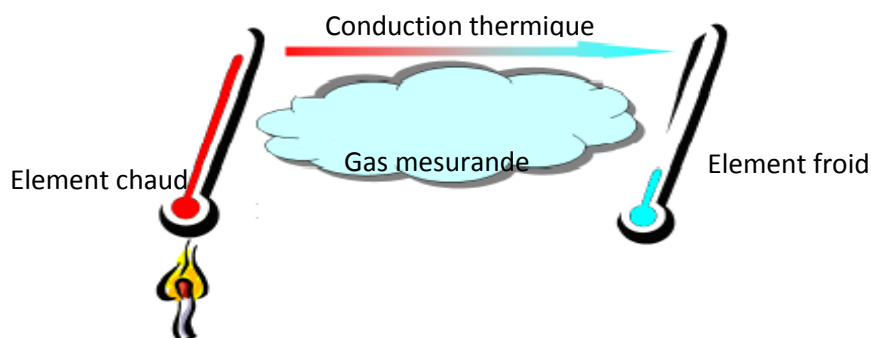


Figure 1.3 : Illustration du principe simplifié du capteur de gaz à conductivité thermique

L'«élément chaud» est chauffé par la puissance fournie en entrée. Normalement, «l'élément chaud» est une résistance alimentée par tension ou courant électrique, le chauffage intervient par effet Joule.

Ensuite, le gaz mesurande, qui se trouve dans cet environnement chauffé, transfère une quantité de chaleur par conduction thermique de «l'élément chaud» à «l'élément froid», ce qui conduit à une diminution de la température de «l'élément chaud».

L'équation 1.1 spécifie bien que la quantité de chaleur conduite par le gaz mesurande à partir de «l'élément chaud» dépend de la conductivité thermique du gaz mesurande.

On aura donc, pour une configuration expérimentale donnée et une puissance d'entrée fixe, les changements de température de «l'élément chaud» dépendantes alors de la conductivité thermique du gaz mesurande. Donc les changements de la conductivité thermique du gaz mesurande peuvent être détectés en mesurant les changements de la température de «l'élément chaud».

1.5 Mesure de température

Les changements de température de «l'élément chaud» doivent être détectés de manière simple, sensible, fiable et peu coûteuse.

Une méthode répandue de mesure de la température est la mesure de la température à base de thermistance, généralement à base de résistances en platine (Pt). La raison en est que les résistances Pt sont supérieures en termes de coefficient de température de résistivité (TCR) précis et, par conséquent, ont une dépendance de température mieux définie.

Cependant, lors de la mesure de température, un problème important dans la mesure de température à base de résistances Pt est que l'effet d'auto-échauffement provoque une élévation de température dans l'élément capteur [23]. L'effet d'auto-échauffement est que lorsqu'un courant passe à travers une thermistance, il génère de la chaleur qui élèvera la température de la thermistance au-dessus de celle de son environnement. Si la thermistance est utilisée pour mesurer la température de l'environnement [24], ce chauffage électrique introduira une erreur significative si aucune correction n'est effectuée. Outre cet effet d'auto-échauffement, les résistances Pt sont mal compatibles avec le procédé de circuit intégré.

Une des méthodes de mesure de la température qui ne pose pas le problème de l'auto-échauffement ou qui n'est pas incompatible avec le procédé IC est la mesure de température à base de thermopile.

De plus, les thermopiles ont diverses propriétés intéressantes :

1. Premièrement, la thermopile est basée sur l'effet Seebeck auto-générateur, ce qui garantit que :

- Le signal de sortie généré par la thermopile n'a pas de décalage ou pas de dérive de décalage, car il ne peut y avoir de signal de sortie sans puissance d'entrée,
- la thermopile ne souffre pas d'interférences des alimentations ou de tout signal physique ou chimique à l'exception de la lumière (qui peut facilement être blindée), car l'effet Seebeck et l'effet photoélectrique sont les deux seuls effets auto-générateurs dans le silicium.
- la thermopile ne nécessite aucune polarisation.
- le circuit de lecture est assez simple, seul un voltmètre est nécessaire.

2. Deuxièmement, la sensibilité de la thermopile n'est guère influencée par les variations des paramètres électriques à travers le substrat ou par la température. Contrairement aux transistors et résistances, dont la sensibilité et le décalage dépendent de la position sur la plaquette et de la température.

Ainsi donc, les changements de température de «l'élément chaud» peuvent être bien détectés par thermopile pour sa bonne compatibilité avec le procédé IC et sans effet d'auto-échauffement.

1.6 Sensibilité du capteur

La méthode choisie, dans le contexte de ce travail, pour mesurer le changement de température de « l'élément chaud » dans les capteurs de gaz à conductivité thermique est basée sur la thermopile. Par conséquent, le signal de sortie du capteur est la tension de Seebeck générée par la thermopile. Ainsi à une puissance d'entrée donnée, la sensibilité du capteur est définie comme le rapport entre la variation de la tension de Seebeck $\Delta U_{Seebeck}$ de sortie et la variation de l'air mesuré. Supposant que la variation de la concentration de gaz mesurée dans l'air est α alors la sensibilité du capteur est exprimée par :

$$S = \frac{\Delta U_{Seebeck}}{\alpha} [mV] \quad (1.5)$$

1.7 État de l'art des capteurs de gaz

1.7.1 Capteurs de gaz chimiques à base de métal sensibles aux gaz

Les capteurs chimiques à base de métaux ou d'oxydes métalliques sensibles aux gaz sont les capteurs de gaz commerciaux les plus utilisés dans les systèmes d'application de sécurité, car ils sont d'une haute sensibilité et d'un coût faible[4, 25, 26, 27]. Cependant, ils requièrent une consommation d'énergie élevée en raison de leur interaction chimique qui dépend fortement des températures élevées et constantes de l'environnement.

Un capteur chimique amélioré et à hautes performances à base de métal sensible aux gaz pour la détection d'hydrogène est décrit dans ce qui suit.

a/ Structure du capteur de gaz et principe de fonctionnement

Le capteur de gaz chimique à oxyde métallique micro-sensible [28], fabriqué avec un processus de micro-usinage de surface est illustré en figure 1.4. Ce capteur de gaz a été monté sur une couche hautement isolée thermiquement pour réduire la perte de chaleur vers le substrat.

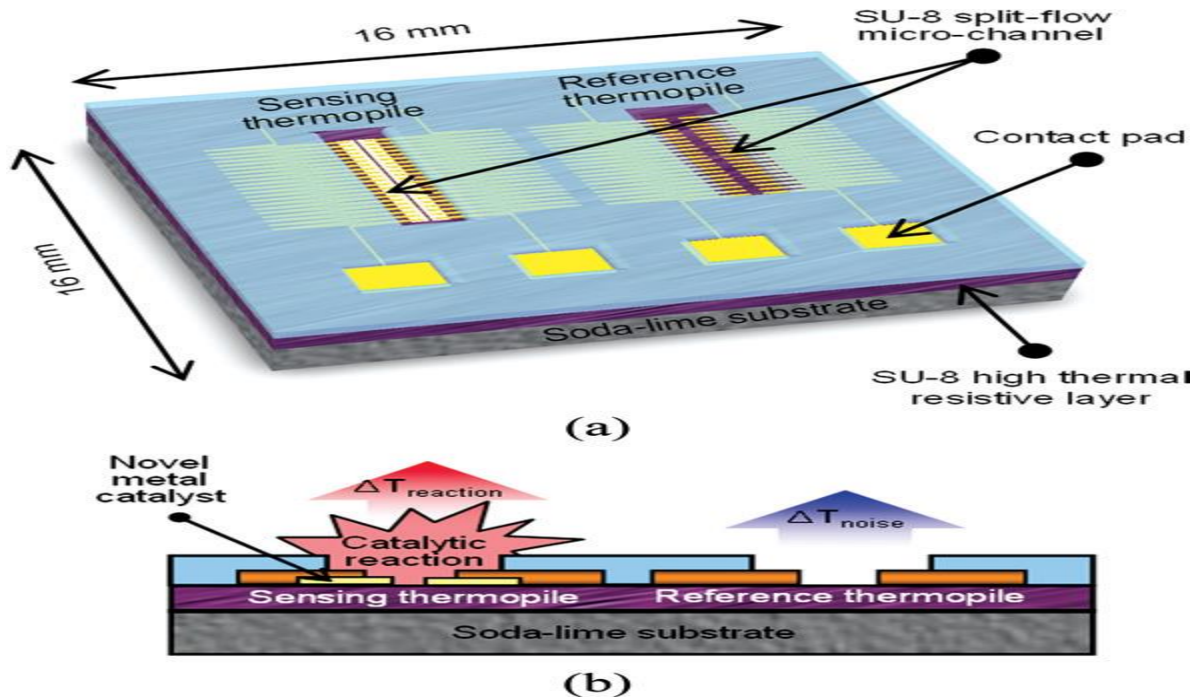


Figure 1.4 : Schéma et principe de détection du capteur de gaz micro-thermoélectrique
 (a) vue conceptuelle.
 (b) principe de la méthode d'auto-compensation utilisant la thermopile de référence pour réduire le bruit thermique externe.

La structure du capteur se compose du catalyseur fait de Palladium sensible aux gaz et de 60 thermocouples Cu-bi. La réaction catalytique se produit uniquement sur la jonction chaude de la thermopile de détection où le catalyseur au palladium est déposé.

Le capteur de gaz détecte l'hydrogène cible en mesurant la chaleur de la réaction catalytique entre l'hydrogène et le palladium. La chaleur de réaction est mesurée par thermopile. Afin de réduire les bruits thermiques externes, une différence entre la tension de sortie de la détection et celle des thermopiles de référence a été mesurée par un amplificateur différentiel. La tension de Seebeck de sortie du capteur qui est générée par la thermopile augmente linéairement avec la concentration d'hydrogène.

b/ Avantages et inconvénients

Il est à noter que ce capteur de gaz n'a pas besoin de réchauffeur, car il mesure la chaleur de réaction de la réaction catalytique entre l'hydrogène et le palladium.

Deuxièmement, l'interaction catalytique au palladium nécessite moins de température environnementale que l'interaction chimique conventionnelle à base de palladium, ce qui induit une consommation d'énergie inférieure à celle d'un capteur de gaz chimique conventionnel à base de palladium.

Troisièmement, les bruits thermiques externes sont réduits en utilisant un amplificateur différentiel pour mesurer une différence entre le voltage de sortie de la détection et la thermopile de référence.

Cependant, la température requise pour l'interaction du catalyseur au palladium doit être constante, ce qui conduit à un temps de réponse lent. De plus, la stabilité à long terme du capteur est limitée en raison de la contamination chimique lors de la réaction catalytique.

1.7.2 Capteurs de gaz par conductivité thermique

Comparés aux capteurs de gaz chimiques, les capteurs de conductivité thermique offrent des possibilités pour une meilleure stabilité à long terme et un temps de réponse rapide. Bien que les capteurs par conductivité thermique ne soient généralement pas aussi sélectifs ou sensibles que les capteurs par gaz chimiques, ils sont plus rapides et plus fiables car ils ne seront pas contaminés lorsqu'ils détecteront les gaz.

Deux capteurs de gaz par conductivité thermique représentatifs pour la détection d'hydrogène sont illustrés ci-dessous.

a/ Capteur par conductivité thermique TCG-3880

Le TCG-3880 (figure 1.5) est une jauge de conductivité thermique commerciale produite par Xensor Integration[29], aux Pays-Bas en 2005. La structure de ce capteur est décrite par A.W. van Herwaarden en détail dans la référence [30].

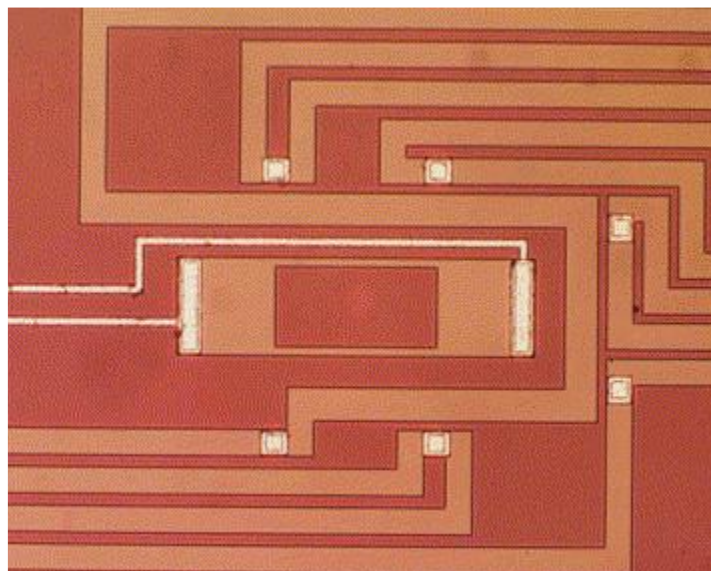


Figure 1.5 : Réchauffeur central (résistance) et jonctions chaudes des thermopiles dans le TCG-3880

La figure 1.5, illustre le réchauffeur central et les jonctions chaudes des thermopiles poly-si de type p et poly-si de type n qui l'entourent. En alimentant en courant la résistance au centre du capteur, la résistance est chauffée et devient un "élément chaud". Pour une puissance d'entrée fixe, la température résultante de la résistance chaude (chauffage) dépend principalement de la conductivité thermique du gaz mesurée. La thermopile mesure le changement de température de la résistance chaude avec la concentration de gaz mesurée, et détecte par conséquent le gaz.

Les avantages de ce capteur est sa stabilité à long terme, son cout (peu coûteux) et son temps de réponse qui est très rapide. Par contre son inconvénient principal est sa faible valeur de sensibilité, comparée à celle des capteurs de gaz chimique.

b/ Capteur de conductivité thermique micro-usine pour l'analyse de gaz naturel

En 2008 S. Udina etc. a fabriqué un capteur de conductivité thermique micro-usiné pour l'analyse du gaz naturel [31] illustré en figure 1.6

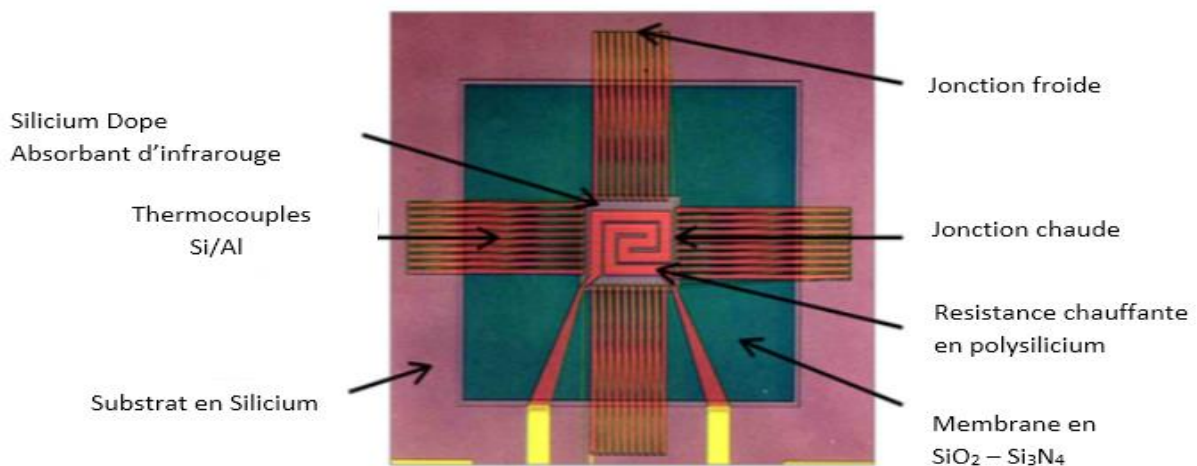


Figure 1.6 : Capteur thermoélectrique micro-usiné

En appliquant des tensions à l'élément chauffant résistif intégré au polysilicium au centre de la membrane, l'élément chauffant résistif agit comme un « élément chaud » et les jonctions en silicium environnantes froides sont « l'élément froid ». La différence de température est mesurée par 40 thermocouples en aluminium et polysilicium dopé en n. Par conséquent, pour une puissance d'entrée fixe, la température résultante de la résistance chaude (chauffage) dépend principalement de la conductivité thermique du gaz mesuré. La thermopile mesure les variations de température de la résistance chaude avec la concentration de gaz mesurée, détecte par conséquent le gaz.

Un diffuseur thermique (thermal spreader), comme le montre la figure 1.7, est adopté pour une meilleure homogénéité de température à travers la plaque chauffante.

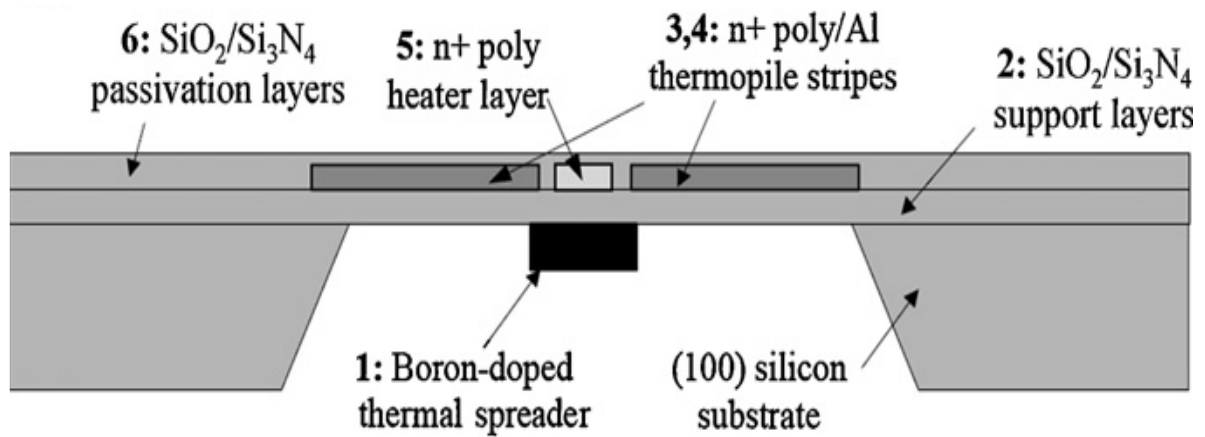


Figure 1.7 : Coupe transversale d'un capteur thermoélectrique micro-usiné

Ce capteur de conductivité thermique a une stabilité à long terme, une haute sensibilité et un temps de réponse très rapide. Par contre, le procédé de micro-usinage en fabrication de masse est assez compliqué ce qui diminue le rendement du dispositif. Et la grande quantité de thermocouples entraînera un bruit thermique relativement élevé.

Conclusion :

Les capteurs de conductivité thermique sont particulièrement adaptés à la détection d'hydrogène, car la conductivité thermique de l'hydrogène est environ 7,5 fois celle de l'air. Cela indique que même une très faible concentration de fuite d'hydrogène dans l'air est encore possible à détecter. Par conséquent, les capteurs de gaz à conductivité thermique sont particulièrement adaptés à la détection d'hydrogène avant que la concentration d'hydrogène n'atteigne la limite inférieure d'explosivité (LIE) de 4% dans l'air dans les applications de sécurité.

Le capteur de gaz à conductivité thermique effectue une mesure de la conductivité thermique du gaz mesuré. L'« élément chaud » est chauffé par la puissance d'entrée fournie. Le gaz mesuré transfère une quantité de chaleur via la conduction thermique de "l'élément chaud" vers "l'élément froid", ce qui conduit à une diminution de la température de "l'élément chaud". Ainsi, les changements de la conductivité thermique du gaz mesuré peuvent être détectés en mesurant les changements de température de "l'élément chaud" à l'aide d'une thermopile.

La Sensibilité, le temps de réponse, la consommation électrique, la stabilité et la limite de détection sont les performances principales à considérer dans les capteurs de gaz. Les capteurs de conductivité thermique ont une stabilité à long terme améliorée et un temps de réponse plus rapide par rapport aux capteurs chimiques. La grande quantité de thermocouples et l'isolation thermique élevée de la membrane sont d'une grande importance pour améliorer la sensibilité du capteur dans les capteurs de conductivité thermique. Cependant, la grande quantité de thermocouples entraînera un bruit thermique élevé.

Chapitre 2 :

**Etude du capteur basée sur une
approche analytique**

Chapitre 2 Etude du capteur basée sur une approche analytique

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, les capteurs de gaz par conductivité thermique basés sur une approche analytique seront présentés. Tout d'abord, le principe détaillé du capteur de gaz basé sur la conductivité thermique sera expliqué. Deuxièmement, l'avantage d'utiliser la technologie de micro-usinage de surface et les détails du processus de fabrication seront clarifiés. Troisièmement, la modélisation thermique sera illustrée et les formules de la température de la résistance du capteur et de la sensibilité du capteur seront dérivées. Enfin, la sensibilité optimale du capteur sera obtenue sur la base des simulations analytiques utilisant les formules dérivées dans le logiciel Matlab.

2.2 Principe détaillé des capteurs de conductivité thermique

Le capteur de gaz par conductivité thermique (figure 2.1) effectue une mesure de la conductivité thermique du gaz mesuré comme suit :

En alimentant en courant la résistance au centre du capteur (la petite case rouge au milieu de la figure (2.1)), la résistance s'échauffe et devient un "élément chaud". Ensuite, le gaz mesuré transfère une quantité de chaleur de la résistance chaude au bord froid par conduction thermique à travers le gaz mesuré et la membrane suspendue, ce qui entraîne une diminution de la température de la résistance chaude. Pour atteindre une sensibilité élevée, la structure du capteur doit être conçue pour réduire la perte de charge à travers la membrane suspendue à des valeurs négligeables. Pour s'assurer que la qualité de la perte de chaleur de la résistance chaude est principalement déterminée par la conductivité thermique du gaz mesuré.

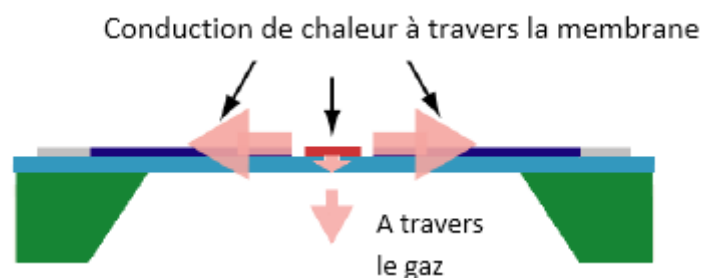


Figure 2.1 : Principe du capteur de gaz par conductivité thermique.

Ainsi, pour une configuration expérimentale donnée et une puissance d'entrée fixe, les changements de température de la résistance chaude dépendent de la conductivité thermique du gaz à mesuré, de sorte que les changements de conductivité thermique du gaz mesuré peuvent être détectés en mesurant les changements de température.

2.3 Processus de fabrication

2.3.1 Processus de micro-usinage de surface

Pour atteindre une sensibilité élevée pour les capteurs de gaz par conductivité thermique à micro-échelle, il est important de réduire la perte de chaleur à travers la membrane suspendue à des valeurs négligeables.

Dans la présentation précédente, la structure de membrane flottante des couches de détection thermoélectriques qui est fabriquée dans un processus de micro-usinage en masse a été principalement utilisée pour minimiser la perte de chaleur pour la membrane suspendue. Cependant, ce procédé a un inconvénient majeur qui réduit le rendement des dispositifs en raison du processus de fabrication compliqué par micro-usinage en masse.

Par rapport au micro-usinage en masse, le micro-usinage de surface est capable de créer des dispositifs beaucoup plus compliqués, capables de fonctionnalités sophistiquées, qui conviennent aux applications nécessitant des éléments mécaniques plus sophistiqués et moins chers [32].

Par conséquent, afin d'améliorer la sensibilité du capteur en minimisant la perte de chaleur, vers la membrane suspendue, sans aucune étape de fabrication complexe, un simple capteur de gaz micro-thermoélectrique structuré à membrane flottante est fabriqué à l'aide d'un micro-usinage de surface, comme le montre la figure 2.2.

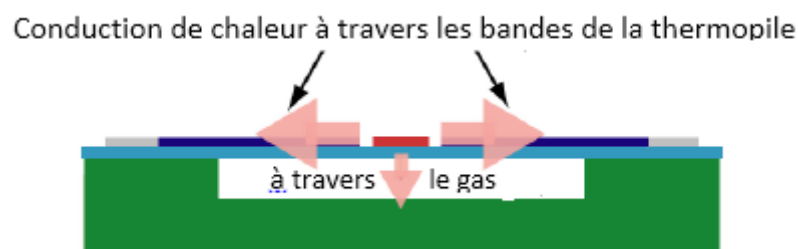


Figure 2.2 : Principe du capteur de gaz par conductivité thermique

2.3.2 Conception des éléments de capteur

Les matériaux et la structure de l'élément chauffant et du thermocouple déterminent grandement les performances du capteur de gaz à conductivité thermique (figure 2.3)

a/ Le réchauffeur

Bien que les résistances en platine (Pt) soient supérieures en termes de coefficient de température de résistivité (TCR) précis et, par conséquent, aient une génération de chaleur mieux définie, les résistances en Pt sont peu compatibles avec les processus IC. Par conséquent, le polysilicium de type P est utilisé ici pour sa linéarité acceptable avec les variations de température et sa conductivité thermique relativement faible [33]. La forme méandrée de la résistance permet une résistance électrique élevée tout en occupant une petite surface.

b/ Les thermopiles

Les matériaux des thermocouples déterminent fortement la sensibilité des capteurs. Les thermocouples polysilicium de type P (coefficient Seebeck $-120 \mu\text{V/K}$) et polysilicium de type N (coefficient Seebeck $170 \mu\text{V/K}$) sont utilisés ici pour leurs coefficients Seebeck relativement élevés. Ils sont connectés dans une configuration de thermopile avec des paires de thermocouples pour augmenter la tension Seebeck totale.

2.4 Modélisation thermique

Le capteur de gaz proposé tel qu'illustré à la figure 2.3 peut être analysé à l'aide d'une analyse de distribution de température tridimensionnelle, tandis que l'effet de l'épaisseur des couches dans ce capteur peut être ignoré car toutes les couches sont des films très minces. La chaleur est transférée dans deux directions, l'une est dans la direction z à travers le gaz mesuré, et l'autre est dans la direction x à travers la poutre.

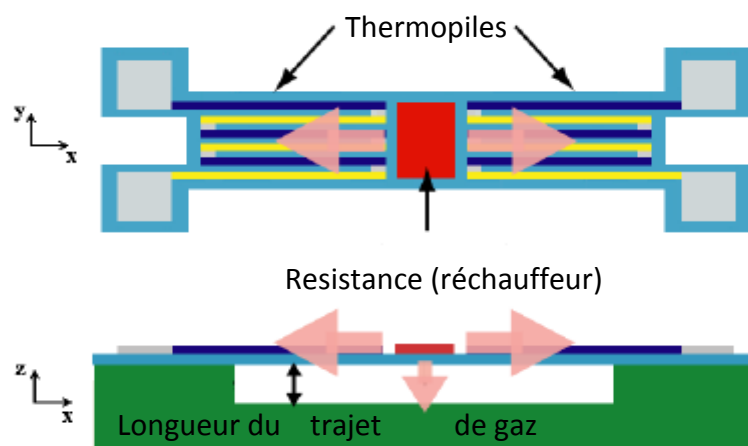


Figure 2.3 : distribution tridimensionnelle de température du capteur à gaz.

2.4.1 Prérequis

Les connaissances de base, l'équation de la chaleur et la loi de conduction thermique qui seront utilisées dans la modélisation thermique sont introduites.

a/ La convection

La convection est le mouvement de masse de transfert de chaleur d'un fluide (tel que l'air ou l'eau) lorsque le fluide chauffé est amené à s'éloigner de la source de chaleur, emportant de l'énergie avec lui. Il existe deux grands types de convection de chaleur :

a.1/ La convection naturelle : lorsque le mouvement du fluide est provoqué par des forces de flottabilité résultant des variations de densité dues aux variations de température du fluide.

a.2/ La convection forcée : lorsque le fluide est forcé à s'écouler sur la surface par une source externe, créant un courant de convection artificiellement induit.

Contrairement aux grandes échelles, on constate que pour le réchauffage à micro-échelle, la convection naturelle du chauffage vers l'air ambiant est négligeable et la perte de chaleur est dominée par la conduction thermique [34]

b/ La radiation

Le rayonnement thermique est un rayonnement électromagnétique émis par un matériau à cause de la chaleur. Comme indiqué dans la loi de Stefan-Boltzmann, l'énergie totale rayonnée par unité de surface d'un corps noir ($\varepsilon=1$) en unité de temps est directement proportionnelle à la température T élevée à la puissance quatre (T étant la température absolue du corps noir). Par conséquent, la puissance radiante totale du corps gris général peut s'écrire :

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.1)$$

Où la constante ε est le facteur d'émissivité (ou d'émission), σ est la constante de Stefan-Boltzmann qui est égale à $5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{w}{m^2 K^4} \right]$ et A est la surface rayonnante.

c/ L'équation de la chaleur

L'équation de la chaleur est une équation différentielle partielle importante qui décrit la distribution de la chaleur (ou variation de température) dans un intervalle donnée au fil du temps. Pour une fonction (x,y,z,t) , de trois variables spatiales (x,y,z) et variable dans le temps (variable temporelle t), l'équation de la chaleur est [35]:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \left(\frac{\delta^2 T}{\delta^2 x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 z^2} \right) + \frac{\Phi_S}{\rho c_p} \quad (2.2)$$

Où :

ϕ_S représente la puissance de la source de chaleur par volume V.

α représente la diffusivité thermique. Elle est exprimée selon l'équation suivante :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (2.3)$$

Dans laquelle ρ est la densité, C_p la chaleur spécifique à pression constante et λ la conductivité thermique.

Lorsque la température ne change pas dans le temps, ce qui signifie que le système est en régime permanent, alors l'équation de la chaleur s'exprime par :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = 0 \quad \rightarrow \quad \alpha \left(\frac{\delta^2 T}{\delta^2 x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 z^2} \right) + \frac{\Phi_S}{\rho c_p} = 0 \quad (2.4)$$

avec $\lambda \neq 0$, l'équation de la chaleur est simplifiée sous la forme :

$$\left(\frac{\delta^2 T}{\delta^2 x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta^2 z^2} \right) + \frac{\Phi_S}{\lambda} = 0 \quad (2.5)$$

d/ La loi de la conduction thermique

La loi de conduction thermique, également connue sous le nom de loi de Fourier, stipule que le flux de chaleur ϕ_q est égal au produit de la conductivité thermique λ par le gradient de température négatif $-\nabla T$, exprimé par :

$$\phi_q = -\lambda \nabla T \quad (2.6)$$

Cette équation détermine le flux de chaleur ϕ_q pour un profil de température T et une conductivité thermique λ , données. Le signe spécifie que la chaleur s'écoule le long du gradient de température.

2.4.2 Modèle thermique du capteur

La figure 2.4 montre la vue de dessus du schéma du capteur (structure à moitié). Afin de calculer la sensibilité du capteur de gaz, la distribution de température dans la direction x le long de la poutre doit être trouvée. Supposons une distribution de température uniforme dans la direction y et une conductivité thermique uniforme de la poutre.

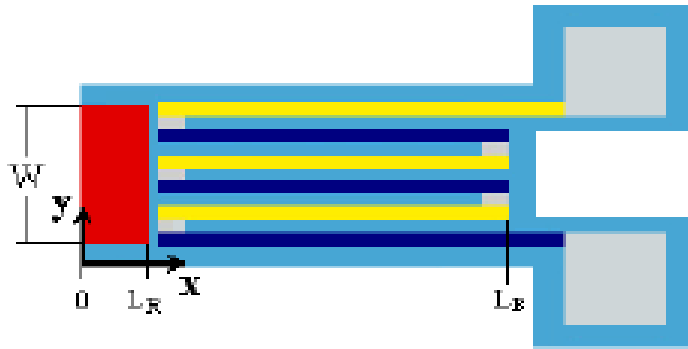


Figure 2.4 : Vue de dessus du schéma du capteur avec la résistance de $x=0$ à $x=L_R$ et le faisceau de $x=L_R$ à $x=L_B$.

2.4.2.1 Rayonnement thermique et conduction thermique sur la résistance

L'équation de transfert de chaleur relative à la résistance ($0 \leq x \leq L_R$) peut être trouvée en utilisant :

- Le rayonnement thermique de la résistance qui est donné par :

$$P_{rad-r} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_R (T_R^4 - T_a^4) \quad (2.7)$$

Où la constante ε est le facteur d'émissivité, σ est la constante de Stefan-Boltzmann qui est égale à $5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$, et A_R est la surface de la résistance rayonnante, T_R est la température de la résistance chaude et T_a est la température du dissipateur de chaleur (bord froid)

- La conduction thermique P_{cond-r} de la résistance au dissipateur thermique à travers le trajet du gaz dans la direction z qui est donnée par :

$$P_{cond-r} = \lambda_g \cdot \frac{1}{d} \cdot A_R (T_R - T_a) \quad (2.8)$$

Où A_R est la surface de la résistance et qui vaut $A_R = W \cdot L_R$. T_R est la température de la résistance chaude, et T_a est la température du dissipateur thermique (bord froid).

Puisque la température de la résistance est modérément supérieure à la température du radiateur, ce qui signifie :

$$T_R > T_a > 0 \quad \text{et donc} \quad \frac{T_R - T_a}{T_a} \ll 1. \quad (2.9)$$

$$\text{donc} \quad 1 < \frac{T_R}{T_a} \ll 2, \quad \text{et par contre} \quad \frac{T_R}{T_a} \approx 1 \quad (2.10)$$

Le rayonnement thermique P_{rad-r} dans l'équation 2.7 est exprimé par

$$P_{rad-r} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_R \cdot (T_R + T_a)(T_R^2 + T_a^2)(T_R - T_a)$$

$$P_{rad-r} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_R \cdot T_a^3 \left(\frac{T_R}{T_a} + 1 \right) \left[\left(\frac{T_R}{T_a} \right)^2 + 1 \right] (T_R - T_a) \quad (2.11)$$

$$\approx 4\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_R \cdot T_a^3 (T_R - T_a) \quad (2.12)$$

Ainsi, la puissance calorifique du radiateur (résistance) à la poutre est :

$$P_{LR} = P_{in} - (P_{rad-r} + P_{cond-r})$$

$$P_{LR} = P_{in} - \left(4\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_R \cdot T_a^3 + \lambda_g \cdot \frac{1}{d} \right) (T_R - T_a) A_R \quad (2.13)$$

2.4.2.2 Flux de chaleur à travers l'interface

D'autre part, les flux de chaleur à travers l'interface sur $x = L_R$ sont établis de deux manières :

a/ Par la loi de conduction thermique, le flux de chaleur exprimé dans l'équation 2.6 peut être décrit comme :

$$\phi_q = -\lambda \frac{dT(x)}{dx} \quad (2.14)$$

dans laquelle la conductivité thermique de la poutre est donnée par la forme :

$$\lambda = \frac{\sum \lambda_s t_s}{\sum t_s} \quad (2.15)$$

ou t_s ($s=1,2,\dots$) sont les épaisseurs de couche des matériaux formant les thermocouples et λ_s leur conductivité thermique.

b/ par définition, le flux de chaleur est la quantité d'énergie qui traverse une surface particulière par unité de surface par unité de temps, qui est décrite comme :

$$\phi_q = \frac{P_{LR}}{A_c} = \frac{P_{in} - \left(4\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_R \cdot T_a^3 + \lambda_g \cdot \frac{1}{d} \right) (T_R - T_a) A_R}{A_c} \quad (2.16)$$

dans laquelle la section transversale $A_c = W \cdot (\sum t_s)$

En combinant l'équation du flux de chaleur 2.14 et l'équation 2.16, il en résulte que :

$$\phi_q = \frac{P_{in} - \left(4\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_R \cdot T_a^3 + \lambda_g \cdot \frac{1}{d} \right) (T_R - T_a) A_R}{A_c} = - \left[\lambda \frac{dT(x)}{dx} \right]$$

En remplaçant A_c et λ par leur expressions ($A_c = W \cdot (\sum t_s)$ et $\lambda = \frac{\sum \lambda_s t_s}{\sum t_s}$) et en supprimant le terme $\sum t_s$ des deux membres de l'équation, on obtient l'équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{dT(x)}{dx} = \frac{\frac{P_{in}}{W} - \left(4\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_R \cdot T_a^3 + \lambda_g \cdot \frac{1}{d} \right) (T_R - T_a) L_R}{\sum \lambda_s t_s} \quad (2.17)$$

2.4.2.3 Rayonnement thermique et conduction thermique sur la poutre

les équations de transfert de chaleur relatives à la poutre ($L_R \leq x \leq L_B$) sont obtenues en se basant sur le rayonnement thermique de la résistance qui est exprimé par :

$$\begin{aligned} P_{rad-b} &= \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_b (T_{(x)}^4 - T_a^4) \\ &\approx 4\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_b \cdot T_a^3 (T_{(x)} - T_a) \end{aligned} \quad (2.18)$$

où la constante ε le facteur d'émissivité ; σ est la constante de Stefan-Boltzmann qui est égale à $5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ et A_b est la surface rayonnante de la poutre, $T_{(x)}$ est la température au point x sur la poutre ($L_R \leq x \leq L_B$) et T_a est la température du radiateur (bord froid)

La conduction thermique P de la résistance au dissipateur thermique à travers le trajet du gaz dans la direction z est donnée par :

$$P_{cond-b} = \lambda_g \cdot \frac{1}{d} \cdot A_r (T_R - T_a) \quad (2.19)$$

où A_r est la surface de la résistance qui est exprimée par $A_r = W \cdot L_r$, T_R est la température de la résistance chaude et T_a est la température du dissipateur thermique.

2.4.2.4 L'équation thermique différentielle du second degré de la poutre

En appliquant l'équation 2.5. on aura :

$$\frac{d^2[T(x)-T_a]}{dx^2} + \frac{\Phi_s}{\lambda} = 0 \quad (2.20)$$

dans laquelle T_a désigne la température ambiante, Φ_s est la puissance de la source de chaleur par volume V , et λ est la conductivité thermique.

Avec $V=Ab.(\sum t_s)$.

La puissance de la source de chaleur/perte du faisceau par volume V s'exprime par :

$$\begin{aligned} \Phi_s &= -\frac{P_{rad-b} + P_{cond-b}}{V} \\ &= -\frac{\left(4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^3 + \lambda_g \cdot \frac{1}{d}\right) A_b}{V} [T(x) - T_a] \\ &= \frac{4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^3 + \lambda_g \cdot \frac{1}{d}}{\sum t_s} [T(x) - T_a] \end{aligned} \quad (2.21)$$

et comme $\lambda = \frac{\sum \lambda_s t_s}{\sum t_s}$, l'équation 2.20, dans laquelle l'expression de Φ_s (équation 2.21) est injectée, prend la forme d'une équation différentielle du second ordre tel que :

$$\frac{d^2[T(x)-T_a]}{dx^2} - \frac{4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^3 + \lambda_g \cdot \frac{1}{d}}{\sum \lambda_s t_s} [T(x) - T_a] = 0 \quad (2.22)$$

Où ε désigne l'émissivité du matériau, σ est la constante de Stefan Boltzmann et x la distance variable le long de la poutre

En posant :

$$C = \sqrt{\frac{4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^3 + \lambda_g \cdot \frac{1}{d}}{\sum \lambda_s t_s}} \quad (2.23)$$

Alors l'équation 2.22 est réduite à la forme :

$$\frac{d^2[T(x)-T_a]}{dx^2} - C^2 [T(x) - T_a] = 0 \quad (2.24)$$

dont la solution générale est donnée par :

$$T(x) - T_a = A. e^{-C.x} + B. e^{+C.x}. \quad (2.25)$$

2.4.2.5 Conditions aux limites

On suppose une distribution de température uniforme dans la direction x sur la poutre.

Comme L_B désigne la longueur de la poutre, L_R la longueur de l'élément chauffant (voir figure 2.4) , les conditions aux limites suivantes s'appliquent :

a/ condition aux limites du radiateur :

$$T(L_B) = T_a \quad (2.26)$$

b/ condition aux limites de la source de chaleur :

$$T(L_R) = T_R \quad (2.27)$$

En appliquant la condition de dissipation thermique dans l'équation 2.26, dans la solution générale de l'équation différentielle du second ordre 2.25, on aura :

$$\begin{aligned} A. e^{-C.L_B} + B. e^{+C.L_B} &= 0 \\ \rightarrow A &= - B. e^{+2C.L_B} \end{aligned} \quad (2.28)$$

En appliquant la condition de source de chaleur (equation 2.27) dans la solution générale de l'équation différentielle du second ordre 2.25 , on aura

$$\begin{aligned} A. e^{-C.L_R} + B. e^{-C.L_R} &= T_R - T_a \\ B. (e^{+C(2L_B-L_R)} + e^{-C.L_R}) &= T_R - T_a \end{aligned} \quad (2.29)$$

De l'équation 2.28 et de l'équation 2.29 , A et B sont dérivés comme suit :

$$B = - \frac{T_R - T_a}{e^{+C.L_B} + [(e^{+C(L_B-L_R)} - e^{-C(L_B-L_R)})]} \quad (2.30)$$

$$A = \frac{(T_R - T_a) e^{+2C.L_B}}{e^{+C.L_B} + [(e^{+C(L_B-L_R)} - e^{-C(L_B-L_R)})]} \quad (2.31)$$

En reprenant A et B dans l'équation 2.25, la solution particulière de l'équation différentielle du second ordre 2.25 est

$$\begin{aligned}
 T(x) - T_a &= \\
 &= \frac{(T_R - T_a)e^{+2CL_B} \cdot e^{-Cx}}{e^{+CL_B} + [(e^{+C(L_B-L_R)} - e^{-C(L_B-L_R)})]} - \frac{(T_R - T_a)e^{+Cx}}{e^{+CL_B} + [(e^{+C(L_B-L_R)} - e^{-C(L_B-L_R)})]} \\
 &= (T_R - T_a) \frac{e^{+CL_B} + [(e^{-C(L_B-x)} - e^{+C(L_B-x)})]}{e^{+CL_B} + [(e^{-C(L_B-L_R)} - e^{+C(L_B-L_R)})]} \\
 &= (T_R - T_a) \frac{\sinh[C.(L_B-x)]}{\sinh[C.(L_B-L_R)]} \tag{2.32}
 \end{aligned}$$

Alors la température sur la poutre est :

$$T(x) = (T_R - T_a) \frac{\sinh[C.(L_B-x)]}{\sinh[C.(L_B-L_R)]} + T_a \tag{2.33}$$

2.4.2.6 Calcul de Tr

L'expression de la température de la résistance chaude est dérivée comme suit, Dérivée de l'équation 2.33 , on aura :

$$\begin{aligned}
 \frac{dT(x)}{dx} &= (T_R - T_a) \frac{d \left\{ \frac{\sinh[C.(L_B-x)]}{\sinh[C.(L_B-L_R)]} \right\}}{dx} \\
 &= (T_R - T_a) \frac{-C \cosh[C.(L_B-x)]}{\sinh[C.(L_B-L_R)]} \tag{2.34}
 \end{aligned}$$

En appliquant l'équation 2.23, l'équation différentielle 2.17 s'écrit :

$$\frac{dT(x)}{dx} \Big|_{x=L_R} = - \frac{\frac{P_{in}}{W} - C^2 (\sum \lambda_s t_s) (T_R - T_a) L_R}{\sum \lambda_s t_s} \tag{2.35}$$

La combinaison de l'équation 2.35 et l'équation 2.34, on obtient :

$$(T_R - T_a) \frac{-C \cosh[C.(L_B - x)]}{\sinh[C.(L_B - L_R)]} = \frac{\frac{P_{in}}{W} - C^2 (\sum \lambda_s t_s) (T_R - T_a) L_R}{\sum \lambda_s t_s} \quad (2.36)$$

d'où :

$$T_R = \frac{\frac{P_{in}}{C.W(\sum \lambda_s t_s)}}{C.L_R + \cosh[C.(L_B - L_R)]} + T_a \quad (2.37)$$

avec :

$$C = \sqrt{\frac{4\varepsilon.\sigma.T_a^3 + \lambda_g \cdot \frac{1}{d}}{\sum \lambda_s t_s}} \quad (2.38)$$

2.4.3 Sensibilité

2.4.3.1 Sensibilité à la conductivité thermique

La sensibilité du capteur à la variation de la conductivité thermique est définie comme le rapport de la variation de la tension Seebeck de sortie à la variation de la conductivité thermique du gaz $\Delta\lambda_g$, pour une puissance d'entrée fixe, et elle s'exprime par :

$$S = \frac{\Delta U_{seebeck}}{\Delta\lambda_g} \left[\frac{mV \cdot m \cdot K}{W} \right]$$

alors C est une fonction de $\Delta\lambda_g$, qui s'exprime par

$$C(\Delta\lambda_g) = \sqrt{\frac{4\varepsilon.\sigma.T_a^3 + (\Delta\lambda_g + \lambda_{air}) \cdot \frac{1}{d}}{\sum \lambda_s t_s}} \quad (2.39)$$

donc :

$$T_R(\Delta\lambda_g) = T_R = \frac{\frac{P_{in}}{C(\Delta\lambda_g).W(\Sigma\lambda_s t_s)}}{C(\Delta\lambda_g).L_R + \cosh[C(\Delta\lambda_g).(L_B - L_R)]} + T_a$$

Dans l'air, la conductivité thermique est $\lambda_g(0) = \lambda_{air}$, $\Delta\lambda_g = 0$ et par conséquence,

$$C_{air} = C(0) = \sqrt{\frac{4\varepsilon.\sigma.T_a^3 + \lambda_{air}.\frac{1}{d}}{\Sigma\lambda_s t_s}} \quad (2.40)$$

et

$$T_R(0) = \frac{\frac{P_{in}}{C(0).W(\Sigma\lambda_s t_s)}}{C(0).L_R + \cosh[C(0).(L_B - L_R)]} + T_a$$

La tension Seebeck est donnée par l'équation :

$$U_{seebeck} = \alpha.n_t.(T_R - T_a) \quad (2.41)$$

Ainsi, la sensibilité est exprimée comme :

$$S = \left| \frac{U_{seebeck-gaz} - U_{seebeck-air}}{\Delta\lambda_g} \right| \quad (2.42)$$

$$= \left| \frac{\alpha.n_t.(T_R(\Delta\lambda_g) - T_a) - \alpha.n_t.(T_R(0) - T_a)}{\Delta\lambda_g} \right| \quad (2.43)$$

$$= \left| \frac{\alpha.n_t.(T_R(\Delta\lambda_g) - T_R(0))}{\Delta\lambda_g} \right| \quad (2.44)$$

avec

$$T_R(\Delta\lambda_g) = T_R = \frac{\frac{P_{in}}{C(\Delta\lambda_g).W(\Sigma\lambda_s t_s)}}{C(\Delta\lambda_g).L_R + \cosh[C(\Delta\lambda_g).(L_B - L_R)]} + T_a$$

et

$$C(\Delta\lambda_g) = \sqrt{\frac{4\varepsilon.\sigma.T_a^3 + (\Delta\lambda_g + \lambda_{air})\frac{1}{d}}{\Sigma\lambda_s t_s}} \quad (2.45)$$

2.4.3.2 Sensibilité à la concentration de gaz mesurée

A une puissance d'entrée donnée, la sensibilité du capteur est définie comme le rapport entre la variation de la tension de sortie Seebeck et la variation de la concentration de gaz mesurée dans l'air. Supposons que α représente la variation de la concentration de gaz mesurée dans l'air, la sensibilité du capteur est exprimée par :

$$S = \frac{\Delta U_{seebeck}}{\alpha} \quad [mV]$$

Supposons que la vitesse de changement de la concentration du gaz mesuré est k , alors la conductivité thermique du gaz est exprimée par :

$$\lambda_g(k) = k \cdot \lambda_{mea} + (1 - k) \cdot \lambda_{air}$$

Alors C en fonction de k aura pour expression :

$$C(k) = \sqrt{\frac{4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^3 + (k \cdot \lambda_{mea} + (1 - k) \cdot \lambda_{air}) \cdot \frac{1}{d}}{\sum \lambda_s t_s}} \quad (2.46)$$

donc

$$T_R(k) = \frac{\frac{P_{in}}{C(k) \cdot W(\sum \lambda_s t_s)}}{C(k) \cdot L_R + \cosh[C(k) \cdot (L_B - L_R)]} + T_a$$

Dans l'air, la conductivité thermique est $\lambda_g(0) = \lambda_{air}$, $k = 0$ alors par conséquent,

$$C_{air} = C(0) = \sqrt{\frac{4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^3 + \lambda_{air} \cdot \frac{1}{d}}{\sum \lambda_s t_s}} \quad (2.47)$$

et

$$T_R(0) = \frac{\frac{P_{in}}{C(0) \cdot W(\sum \lambda_s t_s)}}{C(0) \cdot L_R + \cosh[C(0) \cdot (L_B - L_R)]} + T_a$$

Lorsque la conductivité thermique du gaz mesuré est inférieure à celle de l'air, par exemple du CO₂, la conductivité thermique du mélange-gaz est

$$\lambda_g = k \cdot \lambda_{mea} + (1 - k) \cdot \lambda_{air} < \lambda_{air}$$

et la tension de sortie Seebeck est plus grande que celle dans l'air

$$U_{seebeck-gaz} > U_{seebeck-air}$$

Lorsque la conductivité thermique du gaz mesuré est supérieure à celle de l'air, par exemple H₂, la conductivité thermique du mélange gazeux est

$$\lambda_g = k \cdot \lambda_{mea} + (1 - k) \cdot \lambda_{air} > \lambda_{air}$$

et la tension de sortie Seebeck est plus petite que celle dans l'air

$$U_{seebeck-gaz} < U_{seebeck-air}$$

Comme la tension Seebeck est exprimée par :

$$U_{seebeck} = \alpha \cdot n_t \cdot (T_R - T_a) \quad (2.48)$$

Alors la sensibilité aura pour expression

$$S = \left| \frac{\alpha \cdot n_t \cdot (T_R(k) - T_R(0))}{k} \right| \quad (2.49)$$

et ou les expressions de T_R(k) et C(k) sont :

$$T_R(k) = \frac{\frac{P_{in}}{C(k) \cdot W(\sum \lambda_s t_s)}}{C(k) \cdot L_R + \cosh[C(k) \cdot (L_B - L_R)]} + T_a \quad (2.50)$$

$$C(k) = \sqrt{\frac{4\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_a^3 + (k \cdot \lambda_{mea} + (1-k) \cdot \lambda_{air}) \frac{1}{d}}{\sum \lambda_s t_s}} \quad (2.51)$$

Conclusion :

Les équations thermiques définissant le comportement du capteur ont été établies. De nombreux paramètres tel que le nombre de thermocouples, la longueur des éléments permettant la construction de ces thermocouples et par conséquent de la thermopile apparaissent dans ces équations. La simulation de ces équations nous permettra éventuellement de définir une structure optimale du capteur.

Chapitre 3 :
Simulation sous logiciel Matlab
du capteur de gaz

Chapitre 3 Simulation sous logiciel Matlab du capteur de gaz

3.1 Introduction

Les équations analytiques élaborées dans le chapitre précédent vont être simulées en utilisant le logiciel Matlab. L'objectif étant de comprendre le comportement du capteur dans le cadre de son utilisation pour la détection du gaz hydrogène, tout en essayant d'élaborer une structure optimale en simulant le capteur pour différentes dimensions de ces composants tel que la longueur de la poutre (parcours du gaz selon l'axe x), le nombre de thermocouples et la distance de parcours du gaz selon l'axe z.

3.2 Paramètres de simulation

Certains paramètres à valeurs constantes définis dans les équations de transfert de chaleur et d'autre définissant les dimensions de la structure du capteur sont listés dans le tableau suivant :

| Paramètres | Valeur | Unité |
|--|----------------------|--|
| Facteur d'émission (ϵ) | 0.19 | Sans |
| Constante de Stefan/Boltzmann (σ) | $5.67 \cdot 10^{-8}$ | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ |
| Température ambiante (T_a) | 300 | K |
| Conductivité thermique de l'air (λ_{air}) | 0.0262 | $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| Largeur de la résistance chauffante (L_R) | 28 | μm |
| Longueur de la résistance chauffante (W) | 154 | μm |
| Nombre de thermocouples (nt) | 10 | Sans |
| Epaisseur du matériau définissant le thermocouple (ts) | 0.9 | μm |
| Puissance en entrée (P_{in}) | 1.2 | mW |
| Coefficient de Seebeck (α) | 60 | $\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ |

Tableau 3.1 : Paramètres à valeurs constantes, utilisés lors de la simulation.

Le coefficient de Seebeck choisi est relatif au thermocouple classique Chromel-Constantan, matériaux choisis pour construire les thermocouples formant la thermopile. Lors de a simulation sous Matlab ce paramètre sera utilisé et défini par la valeur $\alpha = 60 \cdot 10^{-6} \text{ V.K}^{-1}$ Le tableau 3.2 suivant liste un ensemble de coefficient de Seebeck.

| Type | Couples | Seebeck Coefficient | Metals | Seebeck Coefficient | Semiconductors | Seebeck Coefficient |
|------|------------------------|---------------------|------------|---------------------|---|---------------------|
| | | $\mu\text{V/K}$ | | $\mu\text{V/K}$ | | $\mu\text{V/K}$ |
| E | Chromel-Constantan | 60 | Antimony | 47 | Se | 900 |
| J | Iron-Constantan | 51 | Nichrome | 25 | Te | 500 |
| T | Copper-Constantan | 40 | Molybdenum | 10 | Si | 440 |
| K | Chromel-Alumel | 40 | Cadmium | 7.5 | Ge | 300 |
| N | Nicrosil-Nisil | 38 | Tungsten | 7.5 | n-type Bi_2Te_3 | -230 |
| S | Pt (10% Rh)-Pt | 11 | Gold | 6.5 | p-type $\text{Bi}_{2x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ | 300 |
| B | Pt (30% Rh)-Pt (6% Rh) | 8 | Silver | 6.5 | p-type Sb_2Te_3 | 185 |
| R | Pt (13% Rh)-Pt | 12 | Copper | 6.5 | PbTe | -180 |
| | | | Rhodium | 6.0 | $\text{Pb}_{0.3}\text{Ge}_{30}\text{Se}_{58}$ | 1670 |
| | | | Tantalum | 4.5 | $\text{Pb}_{0.6}\text{Ge}_{30}\text{Se}_{58}$ | 1410 |
| | | | Lead | 4.0 | $\text{Pb}_{0.9}\text{Ge}_{33}\text{Se}_{58}$ | -1360 |
| | | | Aluminum | 3.5 | $\text{Pb}_{1.2}\text{Ge}_{29}\text{Se}_{58}$ | -1710 |
| | | | Carbon | 3.0 | $\text{Pb}_{1.5}\text{Ge}_{37}\text{Se}_{58}$ | -1990 |
| | | | Mercury | 0.6 | SnSb_4Te_7 | 25 |
| | | | Platinum | 0 | SnBi_4Te_7 | 120 |
| | | | Sodium | -2.0 | $\text{SnBi}_3\text{Sb}_7\text{Te}_7$ | 151 |
| | | | Potassium | -9.0 | $\text{SnBi}_{2.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_7$ | 110 |
| | | | Nickel | -15 | $\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$ | 90 |
| | | | Constantan | -35 | PbBi_4Te_7 | -53 |
| | | | Bismuth | -72 | | |

a/

b/

c/

Tableau 3.2 : a/ Coefficients Seebeck pour les thermocouples standard

b/ Coefficients de Seebeck pour certains métaux et alliages, par rapport au platine

c/ Coefficients de Seebeck pour certains semi-conducteurs

3.3 Simulation de la sensibilité du capteur en fonction de la puissance d'entrée.

Dans cette partie on va simuler la sensibilité du capteur établie grâce aux équations 2.49, 2.50 et 2.51, en fonction de la puissance d'entrée obtenue par effet joule sur la résistance de chauffage. Cette puissance est variable dans la gamme 0 à 2 mW. La sensibilité est simulée, pour différentes concentration du gaz hydrogène à détecter dans la gamme 1% à 4%. Les résultats sont illustres en figure 3.1

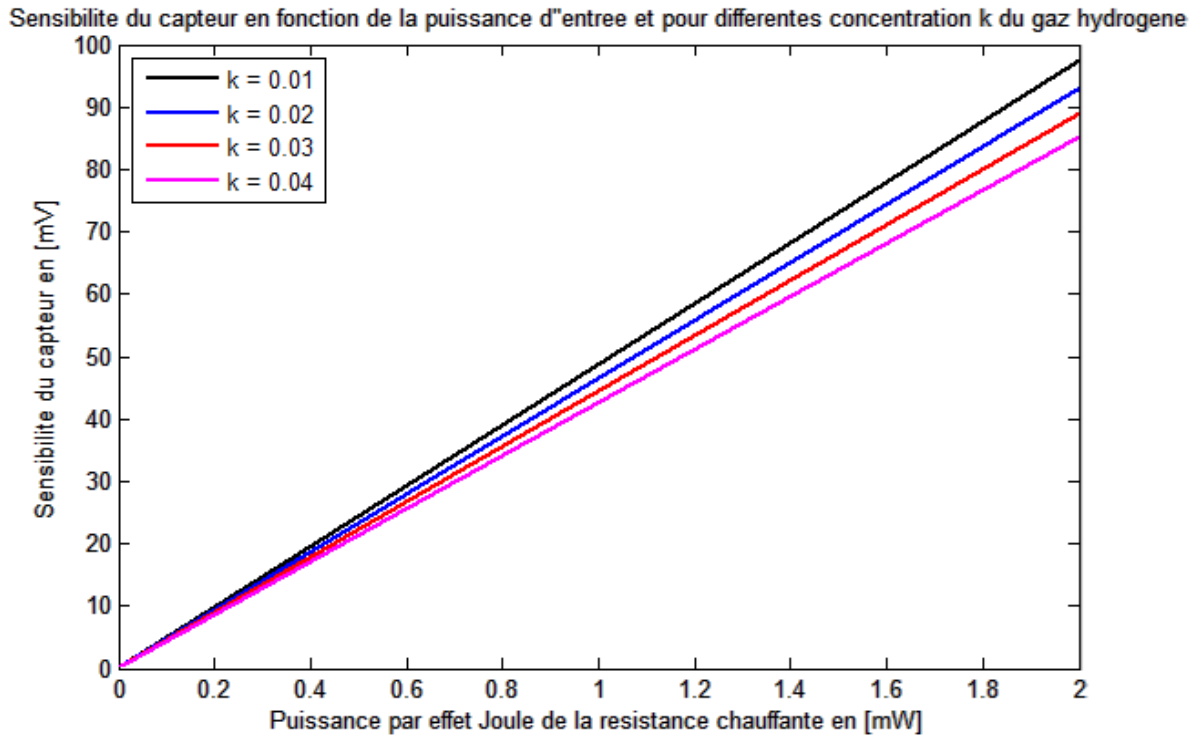


Figure 3.1 : Sensibilité du capteur en fonction de la puissance d'entrée, pour différentes concentration du gaz hydrogène.

L'équation (2.49) qui exprime la sensibilité du capteur en fonction de la concentration k du gaz hydrogène à détecter, est inversement proportionnelle à cette dernière. On remarque bien que lorsque k augmente la sensibilité diminue. Cette diminution augmente lorsque la puissance d'entrée est élevée. Ce résultat nous permet de dire qu'il serait utile de travailler avec des puissances d'entrée plutôt faible. La gamme 0 à 0.6 mW illustre ce résultat (figure 3.2). Dans cette gamme la variation de la sensibilité reste linéaire en fonction de la puissance d'entrée mais l'erreur sur la variation de la sensibilité pour une gamme de k variable de 1% à 4% devient plus faible.

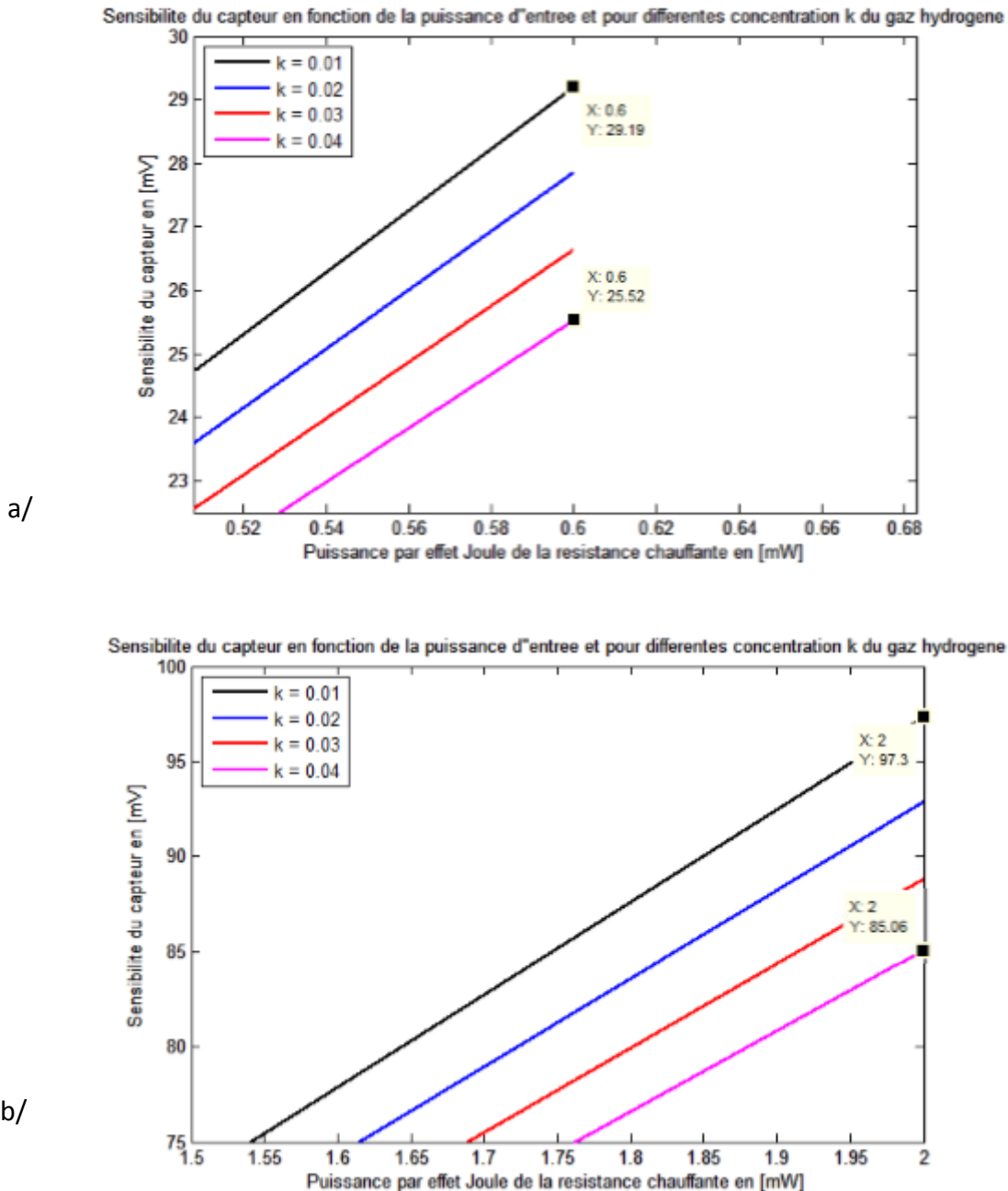


Figure 3.2 : Gamme d'erreur de la variation de la sensibilité

a/ pour une puissance d'entrée de 0 à 0.6 mW

b/ pour une puissance d'entrée de 0 à 2 mW

La gamme d'erreur (approximative) est de $(29.19 - 25.52) = 3.67$ mV pour une puissance d'entrée de 0.6 mW et de $(97.3 - 85.06) = 12.24$ mV pour une puissance de 2 mW.

Dans le cadre des microsystèmes (dispositifs à dimension micrométrique) les puissances faibles seraient souhaitable permettant ainsi de travailler à des faibles températures évitant ainsi un chauffage élevé pouvant causé des perturbations sur le système lui-même vu sa dimension.

3.4 Simulation de la tension Seebeck du capteur en fonction de la puissance d'entrée.

La mesure de la concentration du gaz hydrogène dans l'air est détectée par la mesure de la tension Seebeck au niveau de la thermopile. Les variations de la tension Seebeck en fonction de la concentration du gaz et pour différentes valeur de la puissance d'entrée, sont illustrées en figure 3.3

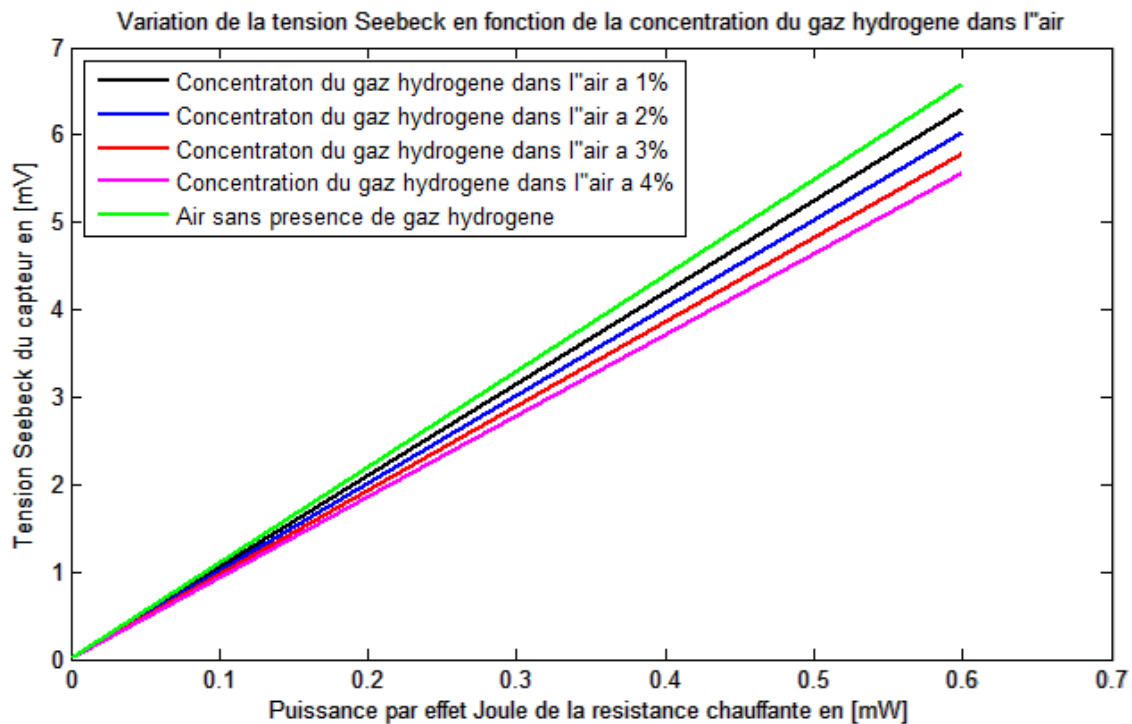


Figure 3.3 : Variations de la tension Seebeck en fonction de la concentration du gaz hydrogène dans l'air et pour différentes valeur de la puissance d'entrée.

L'absence de gaz hydrogène dans l'air n'entraîne pas de variations de la tension Seebeck, car la chaleur produite par la résistance chauffante au niveau des jonctions chaudes est constante. La présence du gaz hydrogène au niveau de l'air va entraîner, avec son déplacement, une partie de cette chaleur ce qui induit une baisse de température au niveau de la jonction chaude et par conséquent la différence de potentiel entre les jonctions chaudes et froides va diminuer. C'est ce qui est mis en évidence sur la figure 3.3 Les illustrations des figures 3.4 et 3.5 montrent que pour une puissance en entrée fixée la tension Seebeck diminue lorsque la concentration (k) de gaz augmente. En pratique la puissance en entrée est fixée, il est donc impérative de connaître pour quelle valeur de puissance en entrée la valeur de la tension Seebeck reste dans le domaine d'une mesure sans trop de composant électronique. Car si la tension est trop basse il est nécessaire d'ajouter un étage d'amplification et donc une augmentation de cout financier.

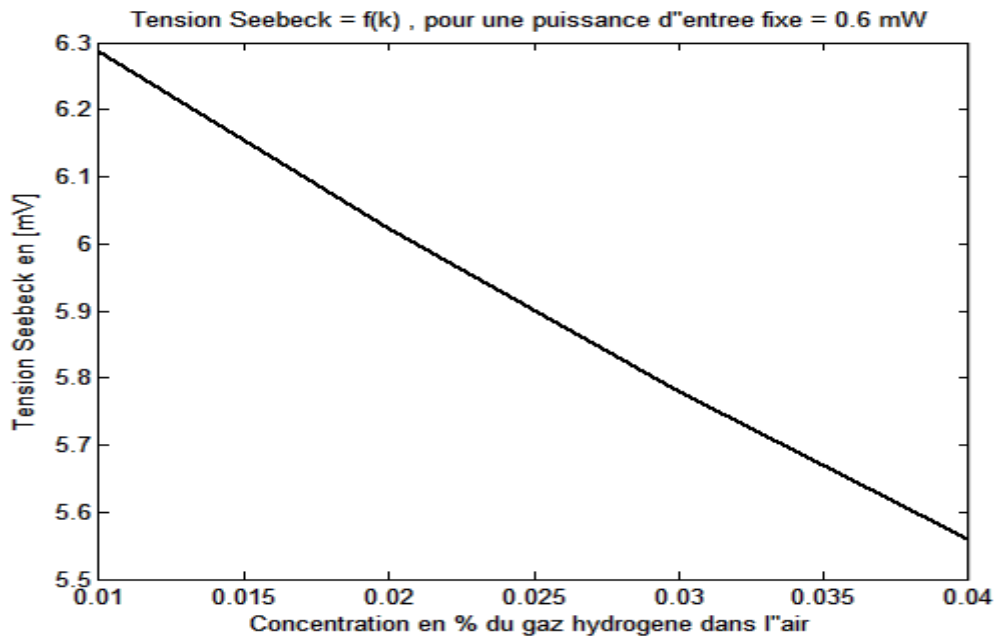


Figure 3.4 : Variation de la tension Seebeck en fonction de la concentration du gaz hydrogène pour une puissance en entrée fixée.

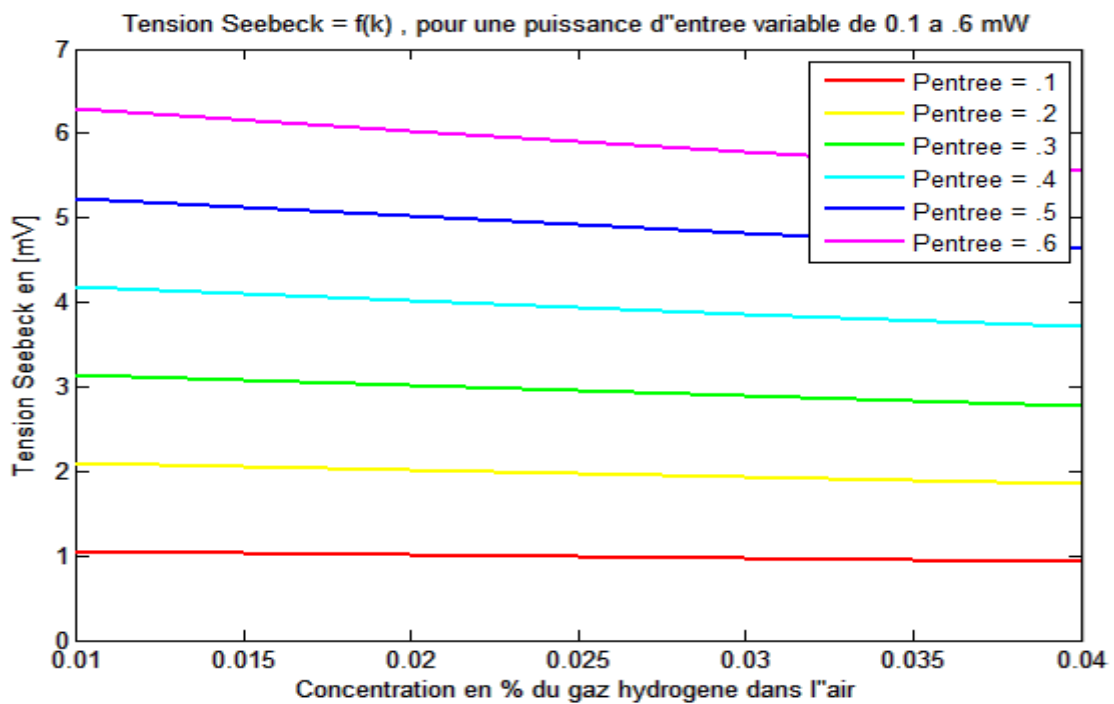


Figure 3.5 : Variation de la tension Seebeck en fonction de la concentration du gaz hydrogène pour une puissance en entrée fixée de 0.1 à 0.6 mW

3.5 Simulation de la sensibilité du capteur en fonction du parcours du gaz selon l'axe z.

Le gaz ayant un parcours selon l'axe des coordonnées z, nous allons simuler la sensibilité du capteur en fonction de ce paramètre et analyser son effet sur cette caractéristique du capteur. Le résultat de cette simulation est illustré sur la figure 3.6

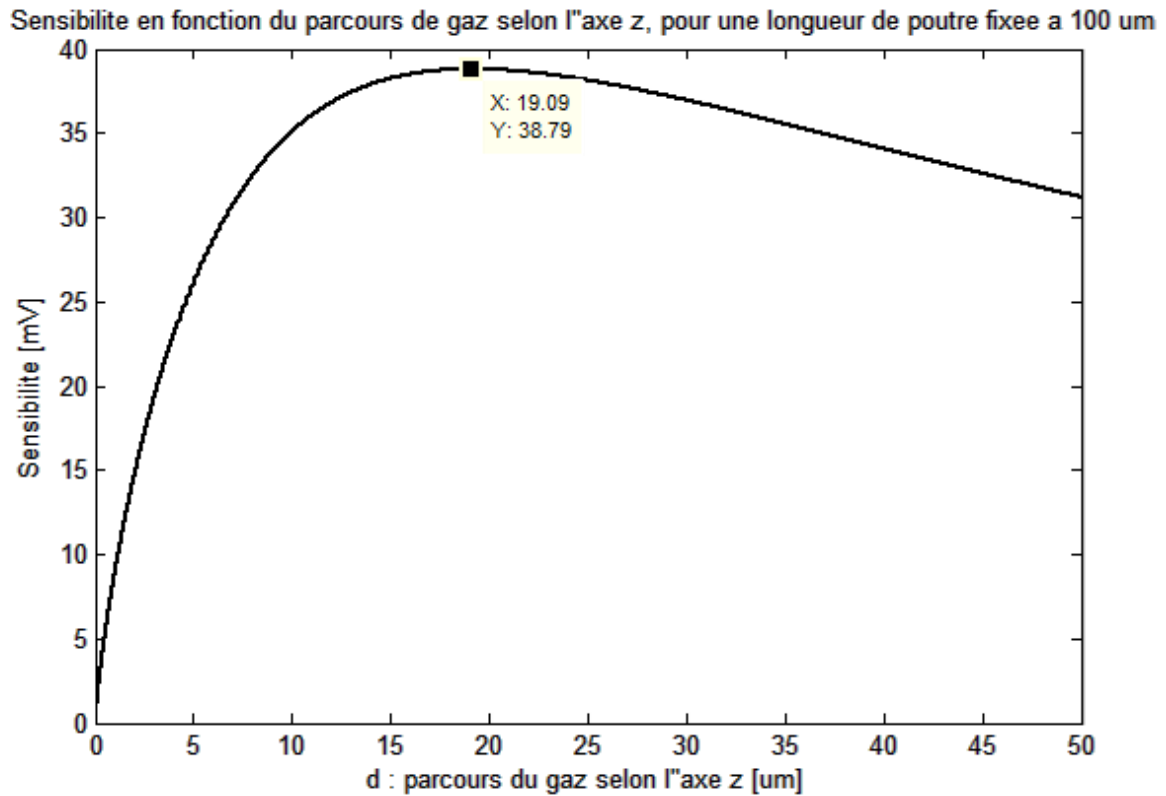


Figure 3.6 : Variation de la sensibilité du capteur en fonction du parcours de gaz selon l'axe z, pour une longueur de poutre fixée à 100 μm .

L'illustration en figure 3.6 montre bien qu'il existe une valeur maximum pour la sensibilité dans les conditions de travail imposées (ici puissance en entrée 0.6 mW et longueur de poutre de 100 μm et concentration du gaz hydrogène $k = 3\%$). Dans le cas de ces conditions il est préférable de concevoir le capteur avec un parcours de gaz selon l'axe z égal à 20 μm puisque la sensibilité est à son maximum qui approche les 39 mV. Pour la même variation de gaz hydrogène ($k = 3\%$), la variation de la sensibilité en fonction de la distance de parcours de gaz selon l'axe z est illustrée en figure 3.7 pour différentes longueur de poutres.

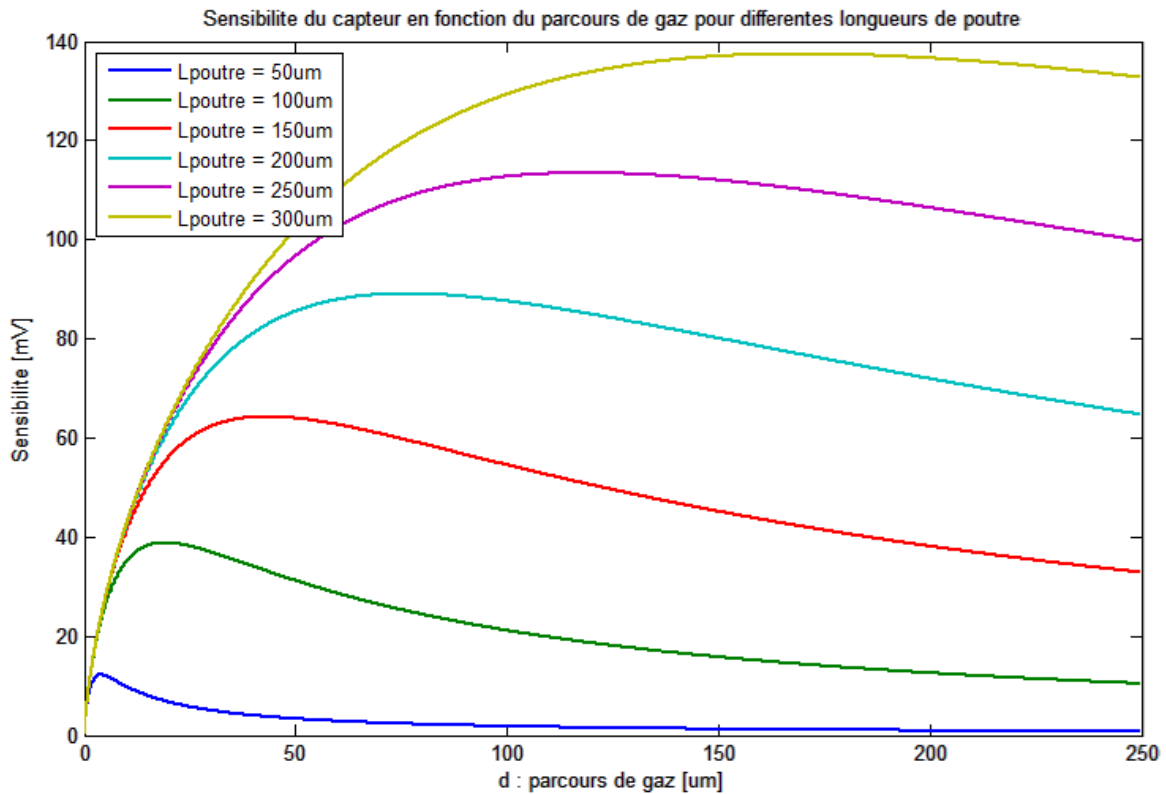


Figure 3.7 : Variation de la sensibilité en fonction de la distance de parcours de gaz pour différentes longueur de poutres.

Les courbes présentent toutes un pic (différent) définissant le maximum de la sensibilité pour une longueur de poutre spécifique, mais pour des longueurs de parcours de gaz variables qui augmentent lorsque la longueur de la poutre augmente.

3.6 Simulation de la sensibilité du capteur en fonction de la longueur de la poutre pour différents parcours du gaz selon l'axe z.

L'illustration de la figure 3.8, révèle que la sensibilité augmente en fonction de la longueur de poutre. Elle présente une sensibilité maximum selon un palier horizontal atteint « rapidement » pour des longueurs de parcours de gaz assez « courts » comparativement à celles atteintes avec des parcours de gaz assez « longs ». Ce résultat nous permet de « prédire » qu'il est souhaitable de travailler avec des parcours de gaz assez courts même si les valeurs de la sensibilité sont approximativement de moitié par rapport au parcours de gaz « longs ». Dans le cas des parcours de gaz « courts », la résistance chauffante est assez proche de la partie inférieure froide du capteur c'est ce qui entraîne ces valeurs de sensibilité.

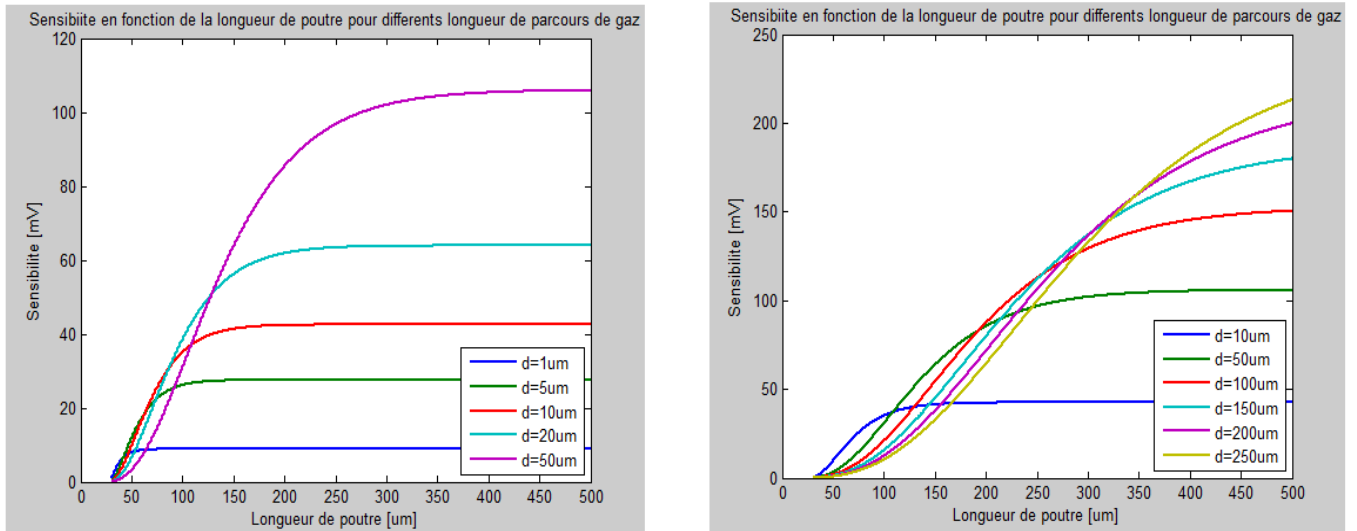


Figure 3.8 : Simulation de la sensibilité du capteur en fonction de la longueur de la poutre pour différents parcours du gaz selon l'axe z.

3.7 Obtention de la structure optimale

L'analyse d'une représentation à trois dimensions (figure 3.9) nous permet de spécifier une structure dont les caractéristiques (longueur de poutre, longueur de parcours de gaz et sensibilité maximum) sont optimales. L'illustration à trois dimensions montre qu'une structure « idéale » aurait pour paramètres (approximation) : $d \approx 50 \mu\text{m}$; $L_{\text{poutre}} \approx 300 \mu\text{m}$; Sensibilité maximum $\approx 850 \text{ mV}$.

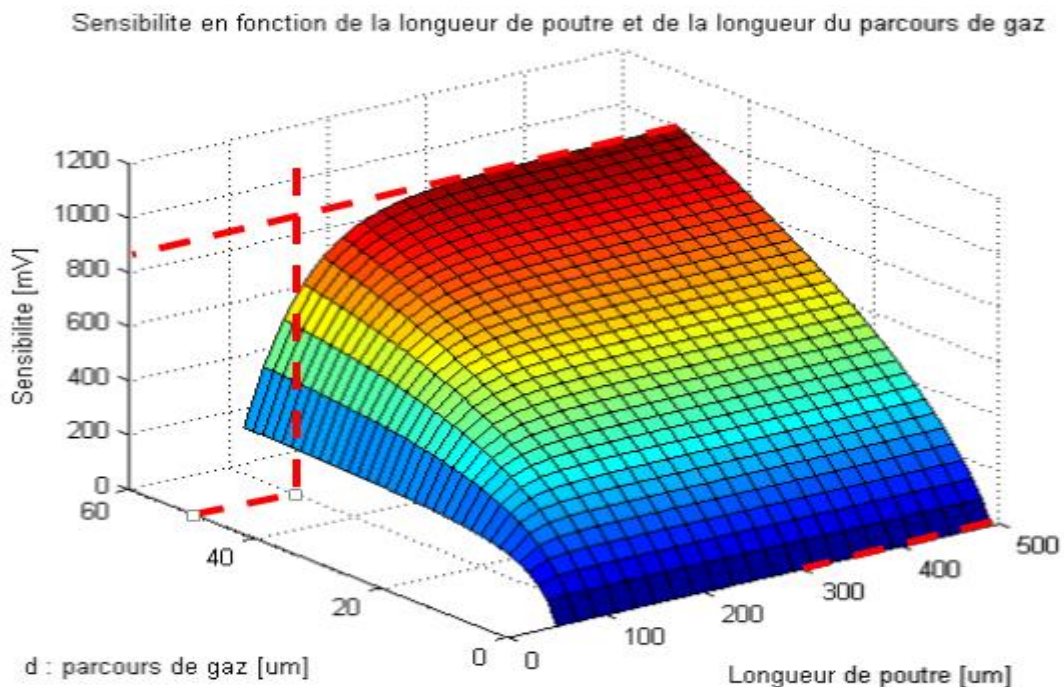


Figure 3.9 : Sensibilité en fonction de la longueur de poutre et de la longueur du parcours de gaz.

Pour la « validation » de ce dernier résultat nous allons considérer la thermopile dont les poutres sont des matériaux semi-conducteurs tel que le p-type Sb_2Te_2 et le PbTe , dont le coefficient de Seebeck vaut $(185 - (-180)) = 365 \mu\text{V.K}^{-1}$ (Tableau 3.2). Nous traçons, pour les mêmes conditions de simulation (concentration du gaz hydrogène égale à 3%), la sensibilité en fonction de la longueur de poutre et de la longueur du parcours de gaz pour pouvoir évaluer la structure optimale avec le maximum de sensibilité. La figure 3.10 illustre ce résultat.

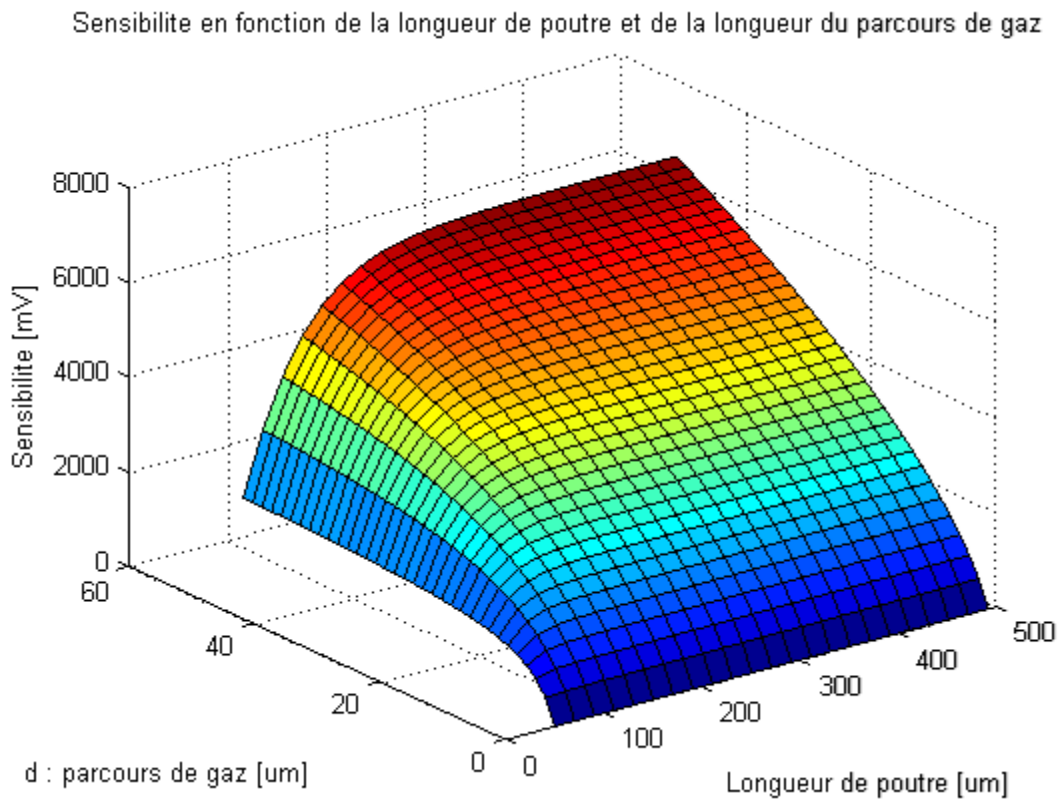


Figure 3.10 : Sensibilité en fonction de la longueur de poutre et de la longueur du parcours de gaz pour la thermopile formée de matériaux semi-conducteurs.

On remarque que la sensibilité augmente ($\approx 5550 \text{ mV}$), ceci est dû à la valeur élevée du coefficient de Seebeck (la sensibilité étant proportionnelle à ce coefficient) ; par contre en terme de structure les dimensions optimales restent identiques :

$d \approx 50 \mu\text{m}$ et $L_{\text{poutre}} \approx 300 \mu\text{m}$.

Conclusion :

La simulation des équations analytiques définissant le modèle thermique du capteur ont permis d'aboutir à une étude qui peut évaluer une des caractéristiques principales du capteur représentée par la sensibilité. Une simulation a trois dimensions, simulant les variations de la sensibilité en fonction de la longueur des poutres formant la thermopile et le trajet du gaz dans la structure adjacente du capteur, a permis d'obtenir une structure optimale pour des conditions de fonctionnement spécifiques.

Conclusion Générale :

L'analyse analytique d'un capteur de gaz pour hydrogène a été étudiée, mettant en relief la modélisation thermique du capteur. Les équations de modélisation du capteur ont été simulées à l'aide du logiciel Matlab. Les résultats de simulation relatifs à la tension Seebeck ont mis en évidence que cette tension diminue en fonction de la concentration du gaz hydrogène dans l'air d'une façon inversement proportionnelle.

La modélisation thermique montre qu'il existe une valeur optimale de la longueur du trajet du gaz pour chaque longueur de poutre.

Lorsque la longueur du trajet du gaz est plutôt courte, la température de la résistance chauffante est fortement influencée par le substrat froid sous-jacent, ce qui entraîne une faible sensibilité aux changements de la conductivité thermique du gaz mesurande.

Lorsque la longueur du trajet du gaz est assez longue, moins de chaleur de la résistance chauffante sera conduite à travers le gaz et plus de chaleur sera perdue à travers la poutre, ainsi la température de la résistance chauffante à une sensibilité plus faible aux changements de la conductivité thermique du gaz mesurande.

Le trace à trois dimensions de la caractéristique sensibilité du capteur en fonction de la longueur du trajet du gaz dans le substrat froid sous-jacent, à la résistance chauffante, et en fonction de la longueur des poutres formant la thermopile, a permis d'établir la structure optimale du capteur.

REFERENCES

- [1] Capteurs de gaz et comptage de gaz : Applications et marchés. Rapport technique, Recherche BCC, 2005.
- [2] L. Brett. Capteurs de sécurité hydrogène et leurs applications dans le stockage d'hydrogène, diffusion et utilisation. Rapport technique, Recherche conjointe de la Commission européenne Centre, 2003.
- [3] J.L. Cruz D. Zalvidea, A. Diez et M.V. Andrés. Capteur d'hydrogène basé sur un Cône en fibre palladié avec un temps de réponse amélioré. Capteurs et Actionneurs, 114 : 268-274, 2006.
- [4] Olaf Schulz Jan Spannhake, Andreas Helwig et Gerhard Müller. État solide Gas Sensing, chapitre Micro-Fabrication of Gas Sensors, pages 1–46. Springer États-Unis, 2009.
- [5] Isolde Simon et Michael Arndt. Propriétés thermiques et de détection de gaz d'un capteur de conductivité thermique micro-usiné pour la détection d'hydrogène dans applications automobiles. Capteurs et actionneurs A : physiques, 97-98 :104-108, 2002.
- [6] Claude Lucat Pascal Tardy, Jean-René Coulon et Francis Ménil. Dynamique capteur de conductivité thermique pour la détection de gaz. Capteurs et actionneurs B : Chimique, 98:63-68, 2004.
- [7] M. Baraton. Optimisation des capteurs de gaz chimiques à l'aide de la spectroscopie infrarouge. SPIE Salle de presse, 2009.
- [8] Otto S. Wolfbeis. Capteurs chimiques et biocapteurs à fibre optique. Chimie analytique, 80:4269-4283, 2008.
- [9] Radhika Dasari et Francis P. Zamborini. Interrupteurs et capteurs d'hydrogène fabriqués en combinant l'électropolymérisation et l'électrodéposition pd à microgap électrodes. Journal de l'American Chemical Society, 130 : 16138-16139, 2008.
- [10] M.P. ; Xiao Z. L. ; Rosenmann D. ; Bienvenue. Kwok W.K. ; Xu, T.; Zach et G.W. Crabtree. Détection d'hydrogène améliorée monocouche auto-assemblée avec films de palladium ultrafins. Lettres de physique appliquée, 86:203104 – 203104-3, 2005.
- [11] Richard P. Vasquez Mangesh A. Bangar Nosang V. Myung Eric J. Menke Reginald M. Penner Yeonho Im, Choonsup Lee et Minhee Yun. Enquête sur un nanofil pd unique à utiliser comme capteur d'hydrogène. Petit, 2:356-358, 2006.
- [12] L B Luo H Wang C S Lee Z H Chen, J S Jie et S T Lee. Applications de nanofils de silicium fonctionnalisés avec des nanoparticules de palladium dans l'hydrogène capteurs. Nanotechnologie, 18, 2007.

- [13] H. Xia Z. Zhao, M.A. Carpenter et D. Welch. Capteur d'hydrogène tout optique à base d'un film mince de palladium à haute teneur en alliage. *Capteurs et Actionneurs*, 113 : 532-538, 2006.
- [14] Fu Chun Huang ; Yung Yu Chen ; et Tsung-Tsong Wu. Une température ambiante capteur d'hydrogène à ondes acoustiques de surface avec nanotiges zno revêtues de pt. *Nanotechnologie*, 20, 2009.
- [15] Inc. Wolfram Research. <http://www.periodictable.com/>.
- [16] AIR LIQUIDE. <http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp>.
- [17] CPO Science. 27.1 conduction. www.cpo.com/ipcres/pdfs/unit9/Ch27Sec1.pdf.
- [18] Wikipédia. [http://en.wikipedia.org/wiki/Transfert de chaleur](http://en.wikipedia.org/wiki/Transfert_de_chaleur).
- [19] Wikipédia. [http://en.wikipedia.org/wiki/Deuxième loi de la thermodynamique](http://en.wikipedia.org/wiki/Deuxième_loi_de_la_thermodynamique).
- [20] Wikipédia. [http://en.wikipedia.org/wiki/Conductivité thermique](http://en.wikipedia.org/wiki/Conductivité_thermique).
- [21] Wikipédia. [http://en.wikipedia.org/wiki/Effet thermoélectrique](http://en.wikipedia.org/wiki/Effet_thermoélectrique).
- [22] M. Sauer A. Graf, M. Arndt et G. Gerlach. Bilan des thermopiles micro-usinées pour la détection infrarouge. *Science et technologie de la mesure*, 18:59-75, 2007.
- [23] A.W. van Herwaarden. Capteurs thermiques (dans les systèmes de capteurs intelligents). John Wiley & Fils, 2008.
- [24] Wikipédia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor>.
- [25] L. Francioso R. Rella P. Siciliano J. Spadavecchia D. S. Presicce A. M. Taurino S. Capone, A. Forleo. Capteurs de gaz à semi-conducteurs : état de l'art et futur Activités. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 5:1335-1348, 2003.
- [26] G. Eranna ; B.C. Joshi ; D.P. Runthala et R.P. Gupta. Matériaux d'oxyde pour le développement de capteurs de gaz intégrés - un examen complet. *Critique Reviews in Solid State and Material Sciences*, 29:111-118, 2004.
- [27] Luyuan Zhang Dong Xiang Chengxiang Wang, Longwei Yin et Rui Gao. Capteurs de gaz à oxyde métallique : sensibilité et facteurs d'influence. *Journal des capteurs*, 10:2088-2106, 2010.
- [28] Parc Chung-il Lee Yong-Jun Kim Se-Chul, Seung-II Yoon et Soonho Song. UNE capteur de gaz microthermoélectrique pour la détection d'hydrogène et d'oxygène atomique. *Analyste*, 134:236-242, 2009.
- [29] Intégration de Xensor. Fiche technique Tcg-3880, 2008. <http://www.xensor.nl/>.

- [30] A.W. van Herwaarden. Vue d'ensemble des puces calorimétriques pour diverses applications. *Thermochimica Acta*, 432 : 192-201, 2005.
- [31] G. Carles J. Santander L. Fonseca S. Udina, M. Carmona et S. Marco. UNE capteur thermoélectrique micro-usiné pour l'analyse du gaz naturel : modèle thermique et les résultats expérimentaux. *Capteurs et actionneurs B : chimique*, 134 : 551–558, 2008.
- [32] ROGER T. HOWE JAMES M. BUSTILLO et RICHARD S. MULLER. Surface micro-usinage pour systèmes microélectromécaniques. *Actes de la IEEE*, 86 : 1552-1574, 1998.
- [33] Y.C. Tai C.H. Mastrangelo et R.S. Muller. *Journal de physique appliquée*, 63:1442-1447, 1988.
- [34] A. Jain X.J. Hu et K.E. Bon fils. Etude de la convection naturelle condition aux limites dans les structures microfabriquées. *Revue internationale de Sciences thermales*, 47:820-824, 2008.
- [35] Wikipédia. http://en.wikipedia.org/wiki/Equation_thermique.