**Chapitre II: Capteurs micromécaniques**

**Introduction**

 Dans cette partie introductive, nous allons présenter synthèse de l’étude bibliographique de l’état de l'art sur les capteurs micromécaniques et les capteurs à résonance de plasmons de surface (SPR. Ensuite, nous donnerons une vue d'ensemble sur le concept de capteurs micromécaniques à effet SPR. Enfin, nous synthétiserons les avantages les plus importants de ces capteurs. À la fin du chapitre, on introduira rapidement les capteurs photoniques à effet SPR.

**1. Capteurs micromécaniques**

 Un capteur micromécanique des stimuli physico-chimiques est constitué de deux composants principaux : une machine micromécanique appelée « transducteur », qui convertit l'action d’un stimulus externe à détecter en mouvement mécanique et un dispositif de lecture qui contrôle le mouvement d’un élément mobile du transducteur (Fig. 1), [1-21].

 Le principe de fonctionnement d’un capteur micromécanique est simple : on quantifie le stimulus à détecter par l’intermédiaire d’un changement de l’état du transducteur induit par ce stimulus. Suivant le paramètre contrôlé, on distingue deux modes de détection : **statique**, où on mesure l’écart d’un élément mobile du transducteur de son état initial et **dynamique**, où on mesure la perturbation du mouvement de cet élément excité par une force externe[[1]](#footnote-1). Notons qu’en règle générale, c’est le contrôle en mode dynamique, qui offre une meilleure précision de mesure, [14]. En pratique, le déplacement maximal de l’élément mobile du transducteur est limité[[2]](#footnote-2). Cela nécessite que le transducteur puisse retourner à son état initial après avoir effectué la mesure. Ce retour peut être assuré soit par une force externe, soit par les forces de rappel élastiques agissant à l’intérieur du transducteur. La dernière méthode est plus simple d’un point de vue pratique. Dans ce cas, le transducteur peut être considéré comme un oscillateur mécanique constitué d'un ressort relié à un solide (l’élément mobile).

Transducteur micromécanique

Dispositif de lecture de l’état du transducteur

Stimulus externe

*M*

*k*

*β*

**Figure 1:** Représentation schématique d’un capteur micromécanique.

Ainsi, la loi du mouvement de l’élément mobile (l’importance du déplacement, par exemple) est définie par la compétition entre les forces entrainées par l’effet à détecter et les forces de rappel élastique. La sensibilité et la résolution totale[[3]](#footnote-3) d’un capteur micromécanique peuvent être augmentées par l’augmentation soit de la sensibilité du transducteur micromécanique[[4]](#footnote-4), soit de la résolution du dispositif de lecture. La dernière méthode semble préférable à tout point de vue. En effet, d’une part, étant donné qu’une déformation importante d’un solide induit une modification irréversible de ses propriétés élastiques, le mouvement de l’élément mobile micro-usiné est limité quant à l'intervalle dynamique. D’autre part, afin d’augmenter la sensibilité d’un transducteur à ressort, on doit soit réduire la raideur du ressort, soit augmenter les dimensions caractéristiques des composants du transducteur. Cependant, cela induit inévitablement une amplification des bruits mécaniques et réduit donc la résolution totale du capteur.

 Dans ce contexte, il ressort de l’étude bibliographique que, pour répondre aux besoins des applications concrètes, le dispositif de lecture doit fournir une **résolution nanométrique**. Il est évident que le dispositif de lecture doit être le plus rapide parmi les autres composants du capteur. Dans le cas des capteurs micro-usinés, la fréquence de résonance mécanique du transducteur est comprise typiquement entre 10 et 200kHz . Pour cette raison, en règle générale, le choix de la méthode de lecture doit assurer le contrôle du transducteur en **temps réel**.

**Remarque** : le design du transducteur doit assurer que l’effet de bruits générés par ces composants ne soit pas détectable par le dispositif de lecture. Pour cette raison, c’est la performance du dispositif de lecture (notamment, sa résolution) qui doit être considérée, en règle générale, comme le point de départ de l’optimisation du design du transducteur micromécanique. Dans le cas d’un transducteur à cantilever, par exemple, si la résolution du dispositif de lecture est ΔR≈1 nm, l’amplitude de vibrations de l’extrémité libre du cantilever associée aux bruits thermomécaniques ΔZBruits doit être inferieure au moins à deux fois ΔR (selon le théorème de Shannon). Autrement dit, on doit optimiser le design du transducteur micromécanique de façon que :

 (1)

Cette relation définit donc de manière générale les paramètres optimaux du transducteur micromécanique. Dans le cas d’un transducteur à bilame rectangulaire, par exemple, la géométrie du bilame doit être telle que:

 (2)

où kB, T, Δf et Q sont respectivement la constante de Boltzmann, la température, la largeur de bande des fréquences de mesure et le facteur de qualité ; L et b sont la longueur et la largeur du cantilever ; ρi, Ei et hi sont respectivement la masse volumique, le module de Young et l’épaisseur de la ie couche du cantilever.

 En ce qui concerne la caractérisation de la performance des capteurs micromécaniques, étant donné que dans la plupart des cas, l’importance du stimulus à détecter est limitée quant à l’intervalle dynamique, le modèle des capteurs peut être associé aux relations linéaires et invariantes. Pour cette raison, la sensibilité totale du capteur peut être présentée sous la forme :  où le premier terme caractérise la sensibilité statique du transducteur micromécanique et le second dénote la sensibilité statique du dispositif de lecture. La résolution totale du capteur est, quant à elle, définie par l’importance des bruits internes présentés dans sa partie moins performante (le transducteur, en général).

 En ce qui concerne les méthodes de lecture en temps réel avec une résolution nanométrique, on peut les grouper en deux familles : électroniques (capacitive…) et optiques (interférométrique, par déviation du faisceau…). L’étude bibliographique montre que dans les applications pratiques, la plus utilisée est la lecture optique par **déviation du faisceau lumineux**, [14]. Cela s’explique par le fait qu’en comparaison avec les dispositifs électroniques, la lecture par déviation du faisceau offre une meilleure résolution et une durée de vie plus longue. Par ailleurs, l’utilisation de la lecture optique permet de simplifier la structure du capteur[[5]](#footnote-5). De plus, un espacement important entre le transducteur et le dispositif de lecture permet d’éviter la nécessité d’adapter ce dernier à l’environnement physique/chimique dans lequel le transducteur fonctionne (qui peut être agressif).

 Le principe de ce dispositif est simple (Fig. 2) : un faisceau lumineux est envoyé sous un angle d’incidence fixe sur un miroir collé sur l’élément mobile. Un mouvement mécanique à contrôler (le fléchissement d’un cantilever, par exemple) induit une déviation du faisceau réfléchi par ce miroir, qui est repéré ensuite par le photodétecteur matriciel.

Dispositif de lecture

Transducteur (*cantilever*)

Miroir

Laser

Photodétecteur matriciel (CCD)

**Figure 2**. Lecture par déviation du faisceau lumineux.

 Dans le cas d’un bolomètre, la lecture optique permet de réaliser le transducteur sans utilisation des métaux et, par conséquent de réduire considérablement à la fois la capacité calorifique de l’absorbeur du rayonnement (notamment à basse température) et les pertes de la chaleur à travers son lien avec le substrat. Ce qui permet d’augmenter la sensibilité du bolomètre et d’améliorer son rapport signal sur bruit. Il est intéressant de noter, de plus, que la lecture optique peut être réalisée par un faisceau lumineux impulsionnel, avec la durée d’un pulse inférieure au temps caractéristique de la réponse thermomécanique du transducteur[[6]](#footnote-6). Cela permet d’obtenir en sortie du bolomètre un signal qui ne contient pas de partie associée à un échauffement de l’absorbeur par le faisceau de lecture. Il est possible donc de réaliser un bolomètre sans bruit de lecture.

 Le principal désavantage du dispositif de lecture par déviation du faisceau est la complexité du design d’un capteur micromécanique **matriciel[[7]](#footnote-7)**. De plus, le contrôle du transducteur, dans ce cas, est effectué par une onde lumineuse progressive et, par conséquent un micro-miroir doit être fixé sur l’élément mobile du transducteur. Ce miroir doit être suffisamment épais afin d’assurer une bonne réflectivité du faisceau de lecture (généralement, une couche d’or d’au moins 200 nm d’épaisseur). Pour cette raison, la contribution du miroir dans la dynamique du mouvement de l’élément mobile, qui a une action nuisible sur la mesure, n’est pas négligeable. Par ailleurs, dans le cas d’un bolomètre, ce miroir augmente la capacité calorifique de l’absorbeur du rayonnement incident et, par conséquent, réduit la sensibilité du transducteur micromécanique.

 En ce qui concerne les applications pratiques de détection micromécanique, elles sont nombreuses et appartiennent à des domaines divers. On peut citer à titre d’exemple une liste des applications trouvées dans la littérature, [1-20] : des capteurs chimiques et biologiques (de CO2, CO, des microorganismes infectieux, des aromates, des drogues…) ; des microscopes à forces atomiques ; systèmes de repérage ultrasonique (pour la vision ultrasonique sous-marine, par exemple) ; détecteurs thermiques du rayonnement et des particules, etc. Notons qu’il s’agit avant tout des applications où la robustesse de fonctionnement et la précision de détection dans un environnement agressif sont les caractéristiques les plus importantes.

**2. Capteurs chimiques et physiques à cantilever**

 Dans les applications pratiques, les plus répandus sont les transducteurs à cantilever qui apparaissent être les plus simples par leur structure géométrique. Comme son nom l'indique, ce transducteur présente un ressort à lame encastrée à une extrémité appelé « cantilever » (Fig. 3), qui assure le retour du transducteur à son état initial après avoir effectué une mesure (dans le mode statique) ou l’excitation de vibrations propres (dans le mode dynamique) à une fréquence choisie. Pour pouvoir varier l’état du transducteur en fonction du stimulus à détecter, une partie de ce ressort est faite sensible à l’état physique ou chimique de son environnement (par exemple, à la concentration d’une espèce chimique ou à une réaction chimique à détecter, à la température, etc.). Cette partie est connue sous les noms de « corps ou couche sensible », « absorbeur », « couche matrice » etc.

Dispositif de lecture

Transducteur (*cantilever*)

Substrat

Absorbeur

Figure. 3 : Vue schématique d’un capteur micromécanique

 Le principe de la conversion du stimulus externe en mouvement mécanique, dans le cas d’un capteur chimique est simple :

- dans le mode statique, une interaction du matériau de l’absorbeur avec la substance chimique à détecter perturbe le bilan des forces (des moments) agissant dans le transducteur et, par conséquent induit un mouvement mécanique d’un élément mobile qui permet au transducteur d’atteindre un nouvel état d’équilibre mécanique. L’écart entre cet état et celui initial est utilisé ensuite pour quantifier le stimulus à détecter ;

- dans le cas du mode dynamique de détection, cette interaction modifie l’une des propriétés physiques du cantilever (la raideur, la masse équivalente, etc.) et, par conséquent induit un décalage de la fréquence de vibration propre du transducteur. Ce décalage varie en fonction de la quantité des molécules ciblées capturée par le transducteur et, par conséquent, peut être utilisé pour quantifier la composition chimique de son environnement (la concentration de gaz à détecter).

Suivant la nature de l’interaction entre l’absorbeur et la substance chimique à analyser, on peut identifier deux principales méthodes de détection chimique : la détection calorimétrique (Fig. 4), [7-8, 14] et la détection par immobilisation de molécules ciblées (Fig. 5), [5-7, 9-12, 14].

Bilame

T0+ΔT

- produit de la réaction

Réaction chimique à détecter

T0

Couche catalytique

- composantes de départ

*État initial*

*Fléchissement thermique*

Figure. 4: Transducteur chimique calorimétrique.

Cantilever avec une couche sensible

*- l’analyte* (molécules à détecter)

*- la couche sensible*

*- les autres composantes chimiques de l’environnement*

*État initial*

*Fléchissement après l’absorption*

Figure. 5 : Transducteur chimique à effet d’immobilisation des molécules ciblées.

 Dans la première méthode de détection, le principe de base repose sur l’effet de bilame : la chaleur dégagée lors d’une réaction chimique à détecter élève la température du cantilever, ce qui induit sa déformation due à la dilatation différente de ses couches. Pour pouvoir obtenir une bonne sélectivité de cette méthode de détection, un catalyseur de la réaction ciblée peut être fixé sur le cantilever. Dans le cas de la détection par immobilisation des molécules, la composition chimique de l’une des couches du cantilever assure une modification sélective des propriétés mécaniques de cette couche en présence de la substance à détecter.

 Suivant la nature de l’interaction utilisée pour capturer des molécules ciblées, on peut grouper ces méthodes en deux familles : l’immobilisation par l’absorption surfacique et celle volumique. Dans le premier cas, l’interaction avec les molécules ciblées soit modifie les propriétés mécaniques d’une des couche du cantilever (par exemple, son module d’élasticité ou les contraintes de surface), [5-7, 10-12, 14], soit augmente la masse totale du cantilever (et, par conséquent, sa fréquence de résonance), [14]. Dans le second cas, les molécules ciblées pénètrent dans le matériau de cette couche en induisant la dilatation volumique de cette couche (un exemple classique est le couple chimique Hydrogène/Palladium, [9]).

**Remarque** : il est intéressant de noter que dans le cas des capteurs chimiques à immobilisation des molécules, le temps de l’analyse chimique est d’autant plus petit que la quantité des molécules à capturer pour réaliser un déplacement minimal détectable est faible. Par conséquent, le temps de mesure peut être réduit par une amélioration de la résolution du dispositif de lecture.

 L’avantage de la détection chimique micromécanique en comparaison avec les détecteurs photoniques classiques est que cette technique permet de simplifier la fonctionnalisation du transducteur. En effet, dans ce cas, la couche sensible (fonctionnalisée) n’est pas en contact direct avec les composants du dispositif de lecture. Par conséquent, ni la composition chimique, ni la structure interne, ni ses dimensions, ni les propriétés diélectriques de cette couche n’ont d’influence sur la performance de ce dispositif ; ce qui offre une grande liberté de choix des matériaux et des méthodes de fonctionnalisation du transducteur. L’inconvénient principal de ces détecteurs est leur sensibilité à la température ambiante (due à l’effet bilame). Une solution simple à ce problème consiste à utiliser un cantilever de référence. Par ailleurs, l’emploi de ce cantilever permet de remédier à l’effet du bruit de fond sur le signal de lecture.

 En ce qui concerne les capteurs d’un stimulus physique, le principe de fonctionnement est identique à celui du cas précédent, à l’exception de la méthode de conversion du stimulus à détecter en mouvement mécanique qui dépend évidemment de sa nature physique. Dans le cas d’un bolomètre micromécanique, par exemple, où le stimulus à détecter est le flux du rayonnement ou des particules, l’élément mobile peut être mis en mouvement par l’effet de bilame (l'absorption d’une partie de l’énergie incidente élève la température d’un bilame du transducteur et induit donc sa flèche). Le déplacement de cet élément, mesuré par un dispositif de lecture, sera utilisé ensuite pour quantifier le flux du rayonnement incident.

**3. Capteurs chimiques à Résonance de Plasmons de Surface (SPR)**

 Les plasmons de surface sont des oscillations cohérentes[[8]](#footnote-8) de la densité des électrons libres à l'interface entre un conducteur et un diélectrique.

 Un capteur (bio-) chimique à effet SPR conventionnel comporte deux composants principaux : un multicouche plasmonique à base d’un métal noble et un dispositif de couplage optique qui permet d’exciter les SPs dans ce multicouche par une onde lumineuse, [21-25]. Le principe de détection par l’effet SPR est simple : une interaction chimique à détecter induit un changement de la composition chimique et, par conséquent de l’indice effectif de réfraction d’un milieu diélectrique du multicouche plasmonique ; ce qui modifie l’efficacité de l’excitation des SPs par un faisceau lumineux de lecture. Ainsi, l’absorption d'une substance chimique à détecter peut être quantifiée par l’intermédiaire des propriétés optiques du multicouche plasmonique (le coefficient de réflexion, par exemple).

 L’intérêt pratique pour les capteurs (bio-) chimique à effet SPR réside dans le fait que cette technique permet de mesurer en **temps réel** des indices de réfraction avec une très haute résolution (jusqu’à 10-5 unités d'indice de réfraction, [23-24]).

# 4. Concept de capteurs micromécaniques à effet SPR

Ce paragraphe est consacré à la présentation du concept de détecteurs micromécaniques à effet de SPR. Dans le concept proposé, un détecteur micromécaniques, quelque soit la nature du stimulus à détecter, comporte un transducteur micromécanique, tel qu’un cantilever sélectivement sensible à ce stimulus et un dispositif de lecture à effet SPR (Fig. 6). Le système de lecture comporte une source de lumière polarisé p (**TM**), un multicouche plasmonique[[9]](#footnote-9), qui supporte la propagation des SPs, un dispositif de couplage optique de l’onde lumineuse incidente avec **SP**s, un photodétecteur et, éventuellement, un système de prétraitement optique du faisceau réfléchi par le multicouche plasmonique.

***Stimulus externe***

Flèche du cantilever

Gap

Dispositif de couplage optique

Photo détecteur

Source lumineuse

Couche plasmonique

Transducteur à cantilever

Figure. 6 : Représentation simplifiée d’un capteur micromécanique à effet SPR : le couplage optique est réalisé via le dispositif de Kretschmann-Raether.

Le principe de fonctionnement des capteurs est qu’un mouvement mécanique de l’élément mobile du transducteur, entraîné par un changement de l’intensité du stimulus externe (ou sa présence), change l’efficacité de l’excitation de SPs dans le multicouche plasmonique[[10]](#footnote-10). Cela se traduit par un changement de sa réflectivité qu’on considère comme le signal en sortie du capteur permettant de quantifier le stimulus externe.

Ainsi, dans le cas d’un transducteur à cantilever par exemple, l’idée clé du concept proposé consiste à utiliser le phénomène SPR pour contrôler le fléchissement (ou la variation de la fréquence de vibration propre) du cantilever induit par un effet à détecter.

 En ce qui concerne le traitement du faisceau lumineux réfléchi par le multicouche plasmonique, compte tenu du caractère complexe des permittivités diélectriques des milieux de ce multicouche[[11]](#footnote-11), l’information sur la flèche du cantilever peut être obtenue par deux méthodes classiques : soit par mesure du décalage de phase, soit par mesure de la variation de l’intensité du faisceau réfléchi induit par cette flèche (angl. « Phase and Intensity Modulation Methods », [22-23]). Il faut noter que c’est la première méthode basée sur l’interférométrie qui offre une meilleure précision de lecture.

 En ce qui concerne le dispositif du couplage optique, dans une vaste variété des dispositifs de couplage existant actuellement (prisme, demi-cylindre, fibres optique, réseaux de diffraction etc.), on ne s’intéresse qu’à ceux qui peuvent être utilisés dans le cas des détecteurs matriciels. Pour cette raison, les dispositifs de couplage les plus convenables sont un prisme à faces planes et un réseau de diffraction plan. En effet, ces dispositifs permettent d’assurer les conditions physiques identiques dans tous les pixels du détecteur.

 En ce qui concerne la source lumineuse, une miniaturisation considérable du capteur peut être obtenue si on utilise un laser à semi-conducteur (λ=650-670nm). Notons de plus qu’une augmentation de la longueur d’onde de la source améliore la résolution sur la mesure de la flèche du cantilever. Cependant, cela augmente la longueur de propagation de SPs et, par conséquent, réduit la résolution latérale du dispositif de lecture ; ce qui impose d’augmenter les dimensions latérales du transducteur et, par conséquent, augmente sa capacité calorifique. C’est pour cette raison que, dans le cas d’un bolomètre micromécanique, un compromis entre la resolution du dispositif de lecture et la sensibilité du transducteur micromécanique est à trouver.

La lecture de l’état du transducteur par l’effet SPR présente deux avantages : une grande sensibilité et une résolution nanométrique de mesure. Il est important aussi qu’il s’agisse d’une technique de mesure en temps réel. De plus, contrairement à la lecture par déviation du faisceau, la lecture à effet SPR permet de réaliser des capteurs micromécanique matriciels de grandes dimensions.

Dans le cas d’un bolomètre micromécanique cela permet de ne pas utiliser de métaux dans la partie sensible. Comme nous l'avons indiqué précédemment, cela permet d’augmenter la sensibilité du détecteur et son rapport signal sur bruit. Par ailleurs, la lecture de l’absorbeur par une onde évanescente n’impose pas de bonne réflectivité des surfaces de ce dernier. Pour cette raison, l’utilisation d’un micro- miroir n’est pas forcement exigée, contrairement au cas des dispositifs de lecture par une onde lumineuse progressive ; ce qui permet de réduire la capacité calorifique de l’absorbeur et, par conséquent, d’augmenter la sensibilité totale du bolomètre.

 Pour résumer, la lecture de l’état du transducteur par effet SPR permet de réaliser des capteurs à la fois très sensibles, rapides et matriciels, capables de fonctionner dans un environnement, où l’utilisation des détecteurs traditionnels à semi-conducteurs est peu envisageable (des milieux chimiquement hautement agressifs, sous une température élevée…). Les avantages cités permettent d’attendre que les capteurs micromécaniques à effet SPR puissent devenir très répandus dans de nombreuses applications.

# 5. Détecteurs photoniques à effet SPR

 À la fin de ce chapitre, il est bon de donner une brève présentation du concept de détection photonique à effet SPR. Les détecteurs photoniques sont destinés à détecter le rayonnement, principalement infrarouge. Le principe de fonctionnement de ces détecteurs implique le phénomène appelé « thermo-réflectivité », [25] : l’énergie du rayonnement absorbée est convertie en un changement de l’indice de réfraction (la permittivité diélectrique) de l’une des couches minces du multicouche. Cela conduit à un changement du coefficient de réflexion des surfaces de cette couche et, par conséquent, de tout le multicouche. L‘effet de thermo-réflectivité est connu depuis longtemps, mais peu exploité dans les détecteurs du rayonnement pour une raison simple : les variations de la température de l’absorbeur et, par conséquent, de son indice de réfraction sont typiquement très faibles ; ce qui rend difficile la mesure de ces variations par les méthodes optiques conventionnelles basée sur les ondes progressives.

 L’indice (la permittivité diélectrique) de l’absorbeur peut être contrôlé par l’intermédiaire de l’effet SPR qui offre une résolution exceptionnelle sur l’indice de réfraction, [22-24] ; ce qui permet de contrôler aussi la température de l’absorbeur avec une précision suffisante pour réaliser des bolomètres utiles dans les applications pratiques. Par ailleurs, afin de réduire les pertes de chaleur par l’absorbeur à travers la couche plasmonique, ces deux éléments doivent être évidemment séparés par un gap.

 L’absence de mouvement mécanique dans le transducteur photonique du rayonnement se traduit par une augmentation de la vitesse de détection. Cela constitue un avantage principal des bolomètres photoniques en comparaison avec les détecteurs micromécaniques.

***Rayonnement incident***

Gap

Dispositif de couplage optique

Photo détecteur

Source lumineuse

Couche plasmonique

Transducteur photonique

Absorbeur

Figure. 7 : Représentation simplifiée d’un détecteur photonique à effet SPR (le couplage optique via le dispositif de Kretschmann-Raether).

**Bibliographie**

1. D. Fengliang et al, “An uncooled optically readable infrared imaging detector”, Sensors and Actuators”, A **133**, 236-242 (2007).
2. Yang Zhao et al, “Opto-mechanical Uncooled Infrared Imaging System: Design, Microfabrication, and Performance”, J. of Microelectromechanical Systems, **11**, 136-146 (2002).
3. Scott R. Hunter et al, “High Sensitivity Uncooled Micro-cantilever Infrared Imaging Arrays”, SPIE Conference Proceedings: Infrared Technology and Applications XXXII, 6206 (2006).
4. P. L. Richards, “Bolometers for infrared and millimeter waves”, J. Appl. Phys. **76** (1), 1-24 (1994).
5. H.P. Lang et al, “Nano-mechanics from atomic resolution to molecular recognition based on atomic force microscopy technology”, Nanotechnology **13**, R29 (2002).
6. H P Lang et al, “An Artificial Nose Based on Micro-cantilever Array Sensors”, Journal of Physics: Conference Series **61**, 663–667 (2007).
7. J.K. Gimzewski et al, “Observation of a chemical reaction using a micromechanical sensor”, Chem. Phys. Lett., **217**, 589 (1994).
8. R. Berger et al, “Thermal analysis using a micromechanical calorimeter”, Appl. Phys. Lett. **69**, 40-42 (1996).
9. D.R. Baselt et al, “Design and performance of a micro cantilever-based hydrogen sensor”, Sensors and Actuators B **88**, 120-131 (2003).
10. M. K. Baller et al, “A cantilever array based artificial nose”, Ultramicroscopy **82**, 1–9 (2000).
11. K.Y. Gfeller et al, “Micromechanical oscillators as rapid biosensor for the detection of active growth of Escherichia coli”, Biosensors and Bioelectronics **21**, 528–533 (2005).
12. F. Quist et al, “Nano-mechanical cantilever motion generated by a surface-confined redox reaction”, J. Phys. Chem. B, **107**, 10691-10695 (2003).
13. J.R. Barnes et al, “A femtojoule calorimeter using micromechanical sensors”, Rev. Sci. Instrum., **65**, 3793-3798 (1994).
14. N.V. Lavrik et al, “Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors”, Rev. Sci. Instrum., **75**, 2229-2253 (2004).
15. P.G. Datskos et al, “Fabrication of quantum well micro-cantilever photon detectors”, Ultramicroscopy **86**, 191-206 (2001)
16. J. Lai et al, “Optimization and performance of high-resolution micro-opto-mechanical thermal sensors”, Sensors and Actuators, A **58**, 113-119 (1997).
17. M. Löhndorf et al, “Micro-cantilever torque magnetometry of thin magnetic films”, J. Appl. Phys., **87**, 5995-5997, (2000).
18. C. Rossel et al, “Active microlevers as miniature torque magnetometers”, J. Appl. Phys., vol. **79**, 8166-8173, (1996).
19. S. Kouravand et al, “MEMS Capacitive Micro Thermometer Based on Tip Deflection of Bimetallic Cantilever Beam”, Sensors & Transducers Journal, **70**, 637-644, (2006)
20. I. Kassamakov et al,” Scanning white light interferometry in quality control of single-point tape automated bonding”, Microelectronic Engineering **84**, 114–123 (2007).
21. E. Kretschmann, H. Raether, “Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light”, Z. Naturforsch., **23**A, 2135–2136 (1968).
22. J. Homola, et al, “Surface plasmon resonance sensors: review”, Sens. Actuators B **54**, 3-15 (1999).
23. J. Homola, “Surface plasmon resonance based sensors, Springer series on chemical sensors and biosensor/Methods and Applications”, in Springer tracts in modern physics, Springer-Verlag Berlin ed., Heidelberg NY, 4, 7-8, 12-13, 62-63 (2006).
24. E.M. Yeatman, “Resolution and sensitivity in surface plasmon microscopy and sensing”, Biosensors & Bioelectronics, **11**, 635-649 (1996).
25. S.V. Mitko et al, “Thermo-reflectance Bolometry”, Rev. Sc. Instr., **76**, 013101.1-5, (2005)
26. M. Bass, et al. (eds.), “OSA Handbook of Optics: Fundamentals, Techniques and Design” **1**, McGRAW-HILL, INC., (1995).
27. J. Hastanin, Y. Renotte, K. Fleury-Frenette, JM Defise and S. Habraken, “A gas micromechanical sensor based on surface plasmon resonance”, Proceedings of SPIE 7113, (2008).
28. J. Hastanin, Y. Renotte, K. Fleury-Frenette and S. Habraken, “A micromechanical sensor of temperature based on surface plasmons resonance”, Sensors and Transducers, **96**, 8-17, (2007).
29. J. Hastanin, Y. Renotte, K. Fleury-Frenette and S. Habraken, “A sensor based on surface plasmon resonance”, WO2007137995, (2007).
1. *Un exemple classique de cette méthode consiste à contrôler l’amplitude de l’oscillation forcée d’une lame du quartz à sa fréquence propre de résonance.* [↑](#footnote-ref-1)
2. *En effet, les dimensions caractéristiques des composants du capteur et les gaps qui les séparent sont limitées technologiquement. Dans le cas des capteurs micro- usinés, par exemple, l’épaisseur typique des gaps entre l’élément mobile et le substrat est comprises entre quelques centaines de nanomètres et quelques micromètres.* [↑](#footnote-ref-2)
3. *Notons que les définitions de ces grandeurs varient évidemment en fonction de la nature du stimulus à détecter, ainsi que du principe de fonctionnement du transducteur et du mode de mesure utilisée dans le dispositif de lecture. Pour un bolomètre thermomécanique, par exemple, la sensibilité peut être définie comme un rapport d’un changement de l’intensité du faisceau de lecture ΔR (ou le décalage de phase, Δφ) à la puissance absorbée ΔP : S=ΔR/ΔP (ou S=Δφ/ΔP).* [↑](#footnote-ref-3)
4. *Le rapport entre l’écart du transducteur micromécanique de l’état initial et l’importance du stimulus à mesurer.* [↑](#footnote-ref-4)
5. *Car cette technique permet de ne pas impliquer les aspects de connectique entre les composants du capteur.* [↑](#footnote-ref-5)
6. *Ce qui, en règle générale, n’est pas possible dans le cas des bolomètres conventionnels électroniques, où la constante de temps du RC circuits électroniques limitant la durée du pulse est supérieure au temps caractéristique de diffusion de la chaleur.* [↑](#footnote-ref-6)
7. *Étant donné qu’on doit associer un photodétecteur matriciel à chaque transducteur dans la matrice.* [↑](#footnote-ref-7)
8. *Le concept de plasmons est donc l’une des techniques de modélisation du comportement physique des solides basées sur la notion de* quasi-particules. *Ainsi, l’idée clé du concept consiste à remplacer l’ensemble des électrons de conduction fortement corrélés appelé « liquide électronique » par un gaz de quasi-particules associées aux oscillations collectives, qui peuvent être excitées dans ce liquide.* [↑](#footnote-ref-8)
9. *Ce multicouche est réalisé à base d’une couche mince d’un métal noble.* [↑](#footnote-ref-9)
10. *Notons que la géométrie de ce multicouche varie évidemment en fonction de celle du dispositif de couplage optique. Autrement dit, ce multicouche n’est pas obligatoirement plan : dans le cas du couplage par une fibre, par exemple, il s’agit d’une géométrie cylindrique.* [↑](#footnote-ref-10)
11. *Ce qui signifie, évidemment que le coefficient de réflexion du milieu plasmonique est aussi une grandeur complexe.* [↑](#footnote-ref-11)