

Chapitre IV : Capteurs optiques

Introduction

Les Microsystèmes Opto-Electro-Mécaniques (MOEMS) sont des systèmes de la taille du micron qui comprennent à la fois des micro-capteurs (incluant éventuellement des fonctions optiques) et des micro-actionneurs. Ils ont donc à la fois la possibilité de percevoir l'état du système et de son environnement, et de réagir à des modifications de cet environnement, à l'aide d'un micro-circuit de contrôle. Ces systèmes peuvent comprendre en plus de la microélectronique conventionnelle, des structures intégrant des mécanismes, des antennes pour l'échange d'information, des éléments optiques et parfois des systèmes de commande, des microsystèmes de puissance, des micro-relais, des microsystèmes de traitement du signal, des sources lumineuses et des détecteurs. Les MOEMS ou encore : « Optical- MEMS » (et les MEMS dont ils sont issus) comprennent donc des mécanismes mis en mouvement de façon contrôlable.

Il s'agit alors de microsystèmes dont les applications et les composants relèvent essentiellement du domaine de l'optique ou de la photonique avec des exemples de réalisations bien connues : miroirs, commutateurs, connecteurs, modulateurs optiques, multiplexeurs-démultiplexeurs en longueur d'onde, ... pour tendre vers des capteurs intelligents (smart sensors) et des actionneurs dotés de caractéristiques supplémentaires comme l'auto-test ou l'autocalibration.

L'objectif de ce cours est donc une introduction à l'origine et aux principales caractéristiques des microsystèmes optiques. Les principales technologies de fabrication seront aussi présentées.

1- Avantages des microsystemes optiques

La question est de savoir pourquoi nous voulons miniaturiser certains objets ?

Pour limiter l'encombrement, Mais pas seulement ...

- les MOEMS requièrent des forces mécaniques très faibles;
- les phénomènes optiques requièrent de très petits déplacements – $\lambda/4$;
- la compatibilité avec les circuits intégrés : par l'utilisation du silicium notamment,
- la miniaturisation autorise l'intégration de la source, de la détection, du traitement de l'information et du conditionnement sur une même puce compatible avec les circuits intégrés; la miniaturisation permet de réaliser des réseaux de capteurs ou de détecteurs;
- la faible distance entre les éléments qui permet la réduction des effets capacitifs et l'utilisation des longueurs d'onde optiques permettent à la fois la réduction des temps de réponse et l'accroissement des bandes passantes;
- la réduction des coûts de fabrication : l'utilisation des technologies issues de la microélectronique permet une fabrication collective (en parallèle à partir d'un même wafer), l'intégration de plusieurs fonctions sur une même puce et la reproduction d'un dispositif à des millions d'exemplaires à un coût moindre;
- l'amélioration de la résistance mécanique du fait de fréquences de résonance très élevées et de l'utilisation dans de nombreux cas de silicium monocristallin.

Quelques inconvénients cependant :

- les problèmes de bruit et d'amplification du bruit;
- des coûts de développement très élevés;
- les limites de la physique à une miniaturisation toujours plus poussée.

2- Origine des microsystemes optiques

Les microsystemes optiques se trouvent au croisement de trois grands domaines :

- la micro-mécanique;
- la micro-électronique;
- l'optique / photonique.

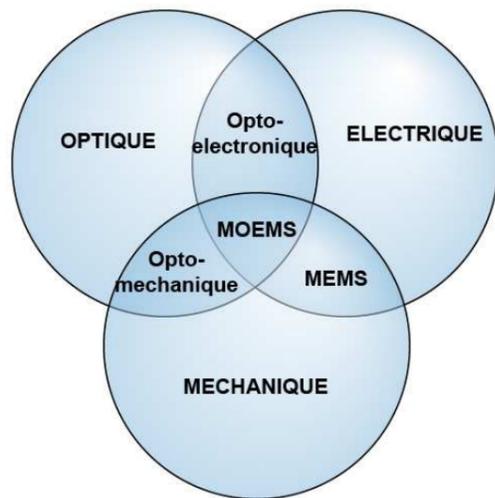


Figure 1 : Les trois grands domaines des microsystèmes optiques.

En 1970, Corning Glass a mis au point les premières fibres très transparentes. A la même époque, Bell Labs mettaient au point les premiers lasers à semi-conducteurs fonctionnant à température ambiante.

On s'aperçoit alors qu'il n'y a pas de meilleur matériau connu pour ces applications que la fibre optique et que la lumière est la source de signal la plus performante pour ces applications.

La photonique était née et présentait la capacité intéressante de pouvoir transmettre plusieurs longueurs d'onde lumineuses différentes simultanément dans la même fibre. C'est le multiplexage, WDM (ou DWDM) pour « wavelength division multiplexing ».

En 2002, une source lumineuse standard était capable d'émettre 1016 photons par seconde, un détecteur de mesurer 1 bit de seulement 10 photons à la cadence de 1015 bits/s à travers une seule fibre optique et on était capable de traiter 64 canaux multiplexés.

Les dispositifs photoniques tendent à s'intégrer « naturellement » avec les MEMS puisque les technologies de microfabrication existent déjà en optique intégrée :

- LED, Diode laser, Laser;
- Fibre optique;
- Guides d'ondes intégrés, modulateurs pour les télécommunications;
- Miroirs, réseaux de diffraction;
- ...

Puisque les longueurs d'ondes optiques concernent le visible et le proche infra-rouge, les composants d'optique intégrée se situent à l'échelle du micromètre.

Les outils théoriques sont de même disponibles à cette échelle (diffraction scalaire).

3- Les principales catégories de microsystemes optiques

Les MOEMS sont à répartir en deux grandes catégories :

- les composants fonctionnant selon les principes de l'optique géométrique pour la commutation spatiale de la lumière (connectique, switch, ...);
- les composants autorisant la manipulation des interférences optiques (modulateurs, réseaux, ...).

Dans les MOEMS, la lumière se propage exclusivement dans l'air, mais la tendance est de coupler les microsystemes optiques avec l'optique intégrée, donc une partie de la lumière se propage alors dans des guides d'ondes.

Les principales catégories peuvent se résumer dans la liste suivante :

- les sources;
- les guides d'ondes optiques;
- l'optique en espace libre;
- l'optique pour les transmissions;
- les miroirs optiques;
- l'optique diffractive;
- l'optique interférométrique;
- les détecteurs.

4- Techniques et procédés de fabrication

4-1. Matériaux pour la micro-fabrication

Le silicium monocristallin est le matériau le plus répandu pour la micro-fabrication pour un certain nombre de raisons. Le germanium ne constitue pas une alternative au silicium pour ce genre d'applications. En effet, pour le germanium, l'oxyde natif GeO_2 est soluble à l'eau ce qui le rend

inintéressant pour la photolithographie. Le verre représente un matériau particulièrement intéressant pour les utilisations chimiques ou biologiques des systèmes optiques.

Les principes de microfabrication à partir du silicium que nous exposons ci-après s'appliquent pour une bonne part aux verres.

On peut citer d'autres matériaux utilisés pour la micro-fabrication : les polymères, les métaux et les semi-conducteurs III-V (AsGA, InP, ...) principalement.

4-2. Le micro-usinage de surface

C'est une technologie d'usinage couche à couche. Différentes couches sont déposées sur un substrat par des procédés de déposition de film mince (CVD, sputtering, ...) et certaines de ces couches sont ensuite enlevées (couches sacrificielles), notamment pour libérer des structures mobiles (fabrication des micro-miroirs orientables). Ces structures sont parfois soulevées verticalement afin de réaliser des surfaces optiques perpendiculaires au substrat. Pour ces derniers, il y a deux possibilités :

- soit la réaction prend place dans le gaz et les produits de la réaction sont adsorbés sur la surface de la cible, la réaction est dite homogène;
- soit la réaction se développe à la surface de la cible, la réaction est dite hétérogène.

4-3. L'auto-assemblage des MOEMS

Les techniques de micro-usinage de surface sont limitées à la fabrication de structures 2D. Une solution proposée consiste à concevoir des figures pivotantes pour autoriser la réalisation de structures 3D complexes. Pour cela on utilise un assemblage de deux éléments par une soudure fondue au niveau d'une arête commune. C'est la minimisation de l'énergie de surface pour un mouvement de reflux de la soudure fondue qui va produire la mise en mouvement d'un élément pour l'amener à se placer dans la position assemblée finale par pivotement autour de l'axe de la soudure.

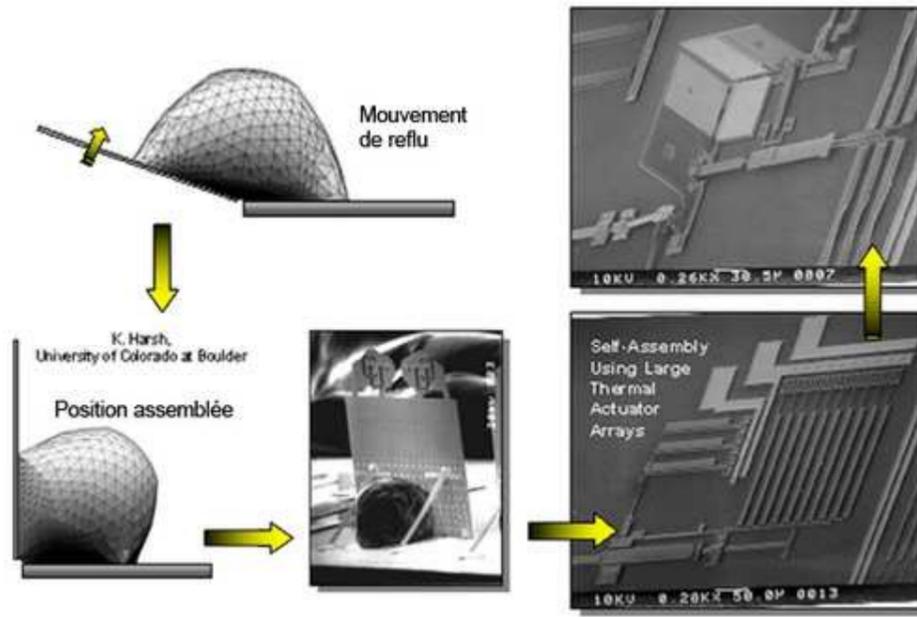


Figure 2 : Autoassemblage.

Les avantages de cette technique :

- précision sub-micronique de l'assemblage en parallèle d'un grand nombre d'éléments;
- contrôle de l'assemblage en utilisant des guides pour la translation ou la rotation;
- pas besoin d'avoir recours à des macro-structures externes;
- permet de réaliser des contacts et des interconnexions mécaniques, électriques ou thermiques;
- fiabilité.

4-4. Autre procédé de micro-usinage : l'ablation laser

C'est une technologie d'usinage récente qui repose sur l'utilisation d'un faisceau laser intense (UV ou IR) générant des impulsions ultrabrèves (femtosecondes).

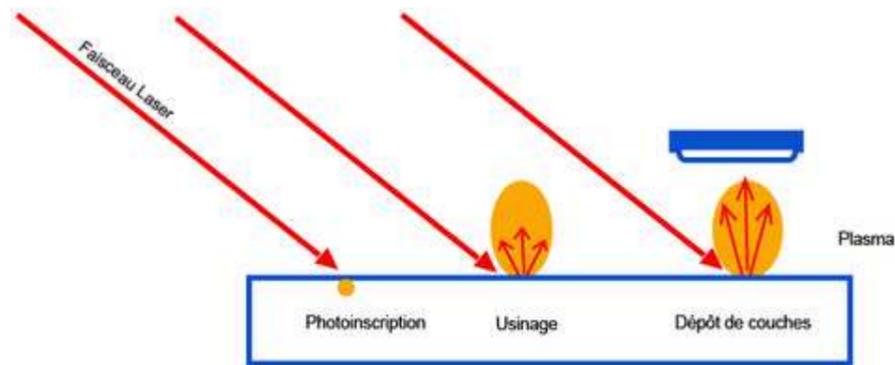


Figure 3 : Schéma de synthèse des différents procédés pouvant utiliser des impulsions brèves.

L'utilisation des impulsions ultrabrèves est souvent motivée par l'absence de dommages collatéraux.

Avantages des impulsions fs :

- champ électrique très élevé;
- arrachement des électrons des couches externes;
- créations d'ions positifs qui se repoussent;
- l'éjection de matière est supposée athermique.

On perce pratiquement tous les matériaux (des aciers aux polymères) par cette technique mais les résolutions restent faibles de quelques dizaines de μm .

5- Caractérisation des microsystemes par la mesure optique

Les techniques basées sur l'interférométrie optique apportent des informations précieuses sur les micro-dispositifs qui sont destinés à actionner ou à être actionnés ou à être déformés. De plus, ces mesures sont sans contact. On peut mesurer par exemple :

- le profil 3D d'un composant ;
- les paramètres de déflexion d'un micro-actionneur;
- le profil 3D dynamique de déformation d'un micro-miroir;
- le comportement thermique d'un micro-composant lors d'un échauffement;
- la détection de défauts de fabrication ou de contraintes;
- ...

6- L'interaction de la lumière avec les micro-structures

6-1. Cas d'une molécule :

- la diffusion de la lumière est due à l'oscillation harmonique du dipôle induit.

6-2. Cas de nanoparticules :

- S'il s'agit d'un isolant, c'est la diffusion Rayleigh (ciel bleu);
- S'il s'agit d'un semi-conducteur, il y a une absorption résonante à une énergie supérieure à l'énergie de bande interdite et on observe un phénomène de fluorescence dépendant de la taille de la nanoparticule;
- S'il s'agit d'un métal, il y a une absorption résonante à la fréquence du plasmon de surface sans émission de lumière.

6-3. Cas des microparticules :

Dans le cas de particules dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde optique ou supérieures, on observe une augmentation de la diffusion vers l'avant et un arc en ciel dû à la diffusion de l'eau.

Les propriétés optiques des petits objets semi-conducteurs vont dépendre fortement de leur nature et de leur taille et dégager trois grandes catégories en fonction de la longueur d'onde moyenne d'émission (M. Bruchez et al (Alivisatos group), Science, 2013, 281) :

- « Red series » : nanocristaux d'InAs avec des diamètres de 3 à 6 nm;
- « Green series » : nanocristaux d'InP avec des diamètres de 3 à 5 nm;
- « Blue series » : nanocristaux de CdSe avec des diamètres de 2 à 5 nm.

On peut ainsi envisager des applications aux biopuces en marquant des biomatériaux avec des nanocristaux de semi-conducteurs émettant dans le visible.

Si on repart de la théorie donnant l'intensité diffusée par un dipôle dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde on constate que si on fait tendre la taille du dipôle vers la longueur d'onde, on augmente la diffusion vers l'avant.

Si maintenant la taille du dipôle atteint le double de la longueur d'onde, on constate une très forte diffusion vers l'avant mais on voit apparaître simultanément :

- des maxima de diffusion dans des directions différentes pour certaines longueurs d'onde dont la répartition est centrée autour sur la direction incidente (c'est l'effet « arc en ciel » observé avec les gouttelettes d'eau);
- des répartitions d'intensité lumineuse analogues pour des groupes de longueurs d'onde ce qui se traduit par des « nuages blancs ».

6-4. Cas de microsphères de diamètre $d \gg \lambda$.

On peut réaliser des microsphères de silice de diamètre 100 μm en chauffant dans une flamme l'extrémité un barreau creux de silice que l'on aura fait « collapser ». Si maintenant on approche une fibre optique effilée (taper), de diamètre de cœur de quelques microns, en la positionnant perpendiculairement à un diamètre de la microsphère, on observe que pour certaines longueurs d'onde il peut y avoir couplage de la lumière se propageant dans la fibre vers un mode de galerie se propageant le long d'un cercle sur la microsphère (Ming Cai, Oskar Painter et Kerry Vahala, Phys Rev Lett 85, 74, 2000). On s'aperçoit alors que si la microsphère de silice est dopée à l'Erbium (Er), la microsphère lase ! La microsphère se comporte alors comme un microrésonateur dont les performances peuvent être caractérisées par la facteur de qualité Q.

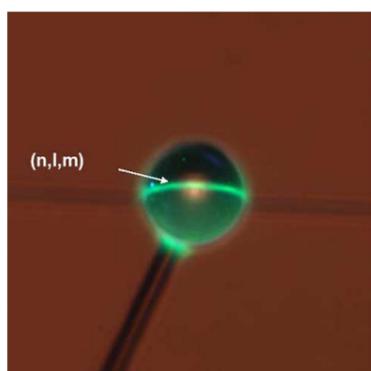


Figure 4 : Résonateur constitué d'une microsphère de silice.

Dans le cas d'un résonateur laser « classique » un facteur de qualité Q de l'ordre de $10^3 - 10^4$ est considéré comme excellent. Le facteur de qualité Q d'un résonateur constitué d'une microsphère de silice de diamètre 100 μm a été mesuré voisin de 1010 par M.L. Gorodetsky, A.A. Savchenkov et V.S. Ilchenko (Opt. Lett. 21, 453, 1996) !!!

Les microsphères ouvrent ainsi des possibilités d'applications variées telles que :

- microlasers à faible seuil;
- filtres optiques de bande étroite;
- capteurs sensibles en-dessous de la profondeur d'une monocouche;

- multiplexeurs pour les télécommunications;
- optique non linéaire;
- expériences en électrodynamique quantique;
- ...

7- Etude de cas : les micro-miroirs orientables;

Les systèmes à micro-miroirs orientables sont probablement les systèmes de commutateurs de lumière les plus sophistiqués. L'étude de cas proposée s'appuie sur l'analyse des caractéristiques de micro-miroirs orientables fabriqués par Texas Instruments pour réaliser des systèmes de projection. Ces systèmes font appel à des micro-miroirs orientables répondant à la technologie DMD « Digital Micromirror Devices ». Seul l'aspect « micro-optique » de ces objets sera étudié, on ne s'intéressera pas au système d'adressage et de traitement du signal.

8-1. Caractéristiques

Les systèmes à micro-miroirs orientables étudiés sont constitués d'une matrice rectangulaire de centaines de milliers de miroirs microscopiques orientables. Chacun de ces miroirs mesure moins du cinquième de la largeur d'un cheveu et correspond à un pixel dans la construction d'une image projetée.

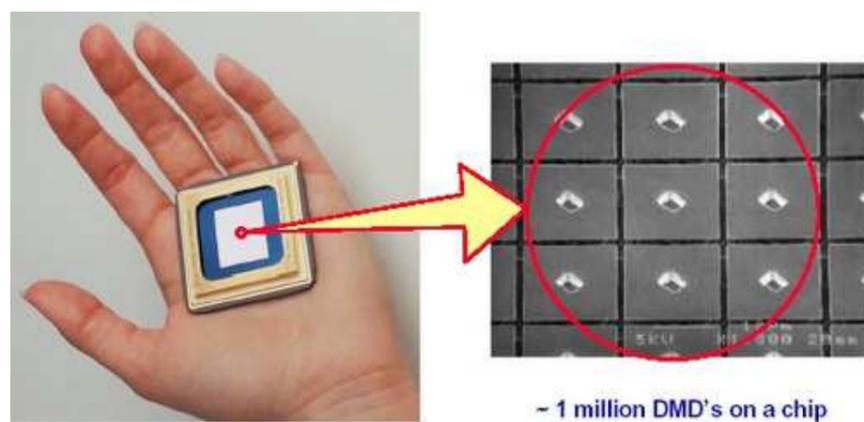
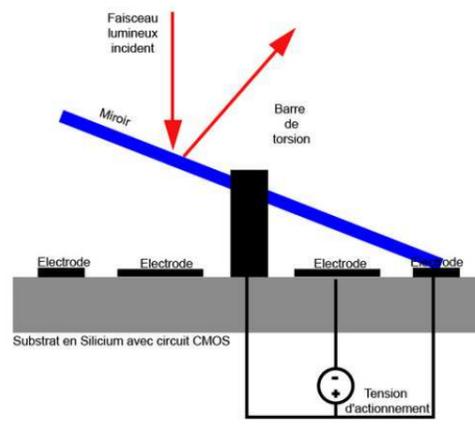
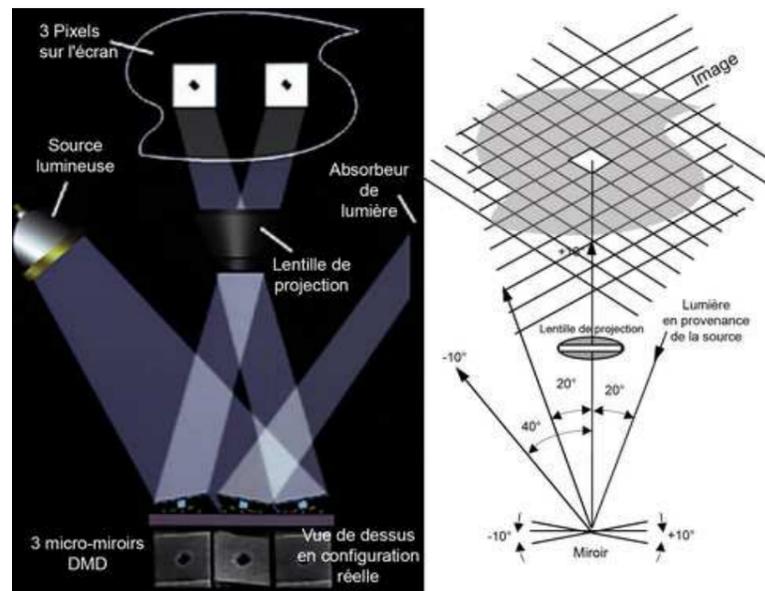


Figure 5: Ordre de grandeur de la taille d'un DMD.

La structure de chaque miroir est décrite par le schéma ci-dessous (à gauche), de même que le principe du système de projection (à droite):



(a)



(b)

Figure 6 : (a) Structure d'un miroir, (b) Principe du système de projection.

Ces systèmes de projection sont caractérisés par :

- une grande luminosité
- un fort contraste
- une échelle des niveaux de gris contrôlée par modulation digitale
- compacts et légers
- faible consommation d'énergie

8-2. Origine et évolutions

Avant la naissance des DMD (« Digital Micromirror Devices»), il y avait les DMD (« Deformable Mirror Devices ») :

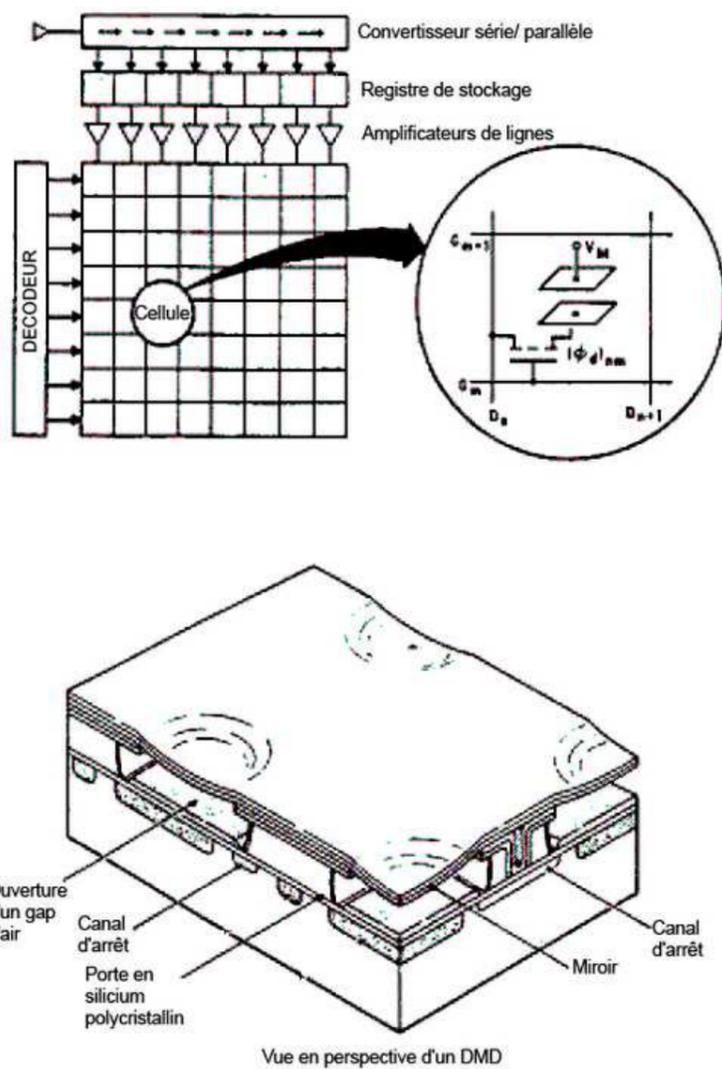


Figure 7 : Schéma de principe d'un DMD (Deformable Mirror Devices).

Les premiers ont été rapportés en 1980 et ils utilisaient les déformations locales d'un miroir métallique (SLM : Spatial Light Modulator) adressées par une matrice 128 x 128 de transistors CMOS selon une architecture de type DRAM. Le temps de réponse des miroirs était de l'ordre de 25 μ s avec un temps d'attente des sources de 200 ms. Chaque pixel avait une taille de 51 μ m x 51 μ m et était séparé de la source par un gap d'air de 620 nm. La surface active du miroir représentait 32% du total.

On a distingué principalement quatre évolutions des dispositifs (Figure 8) :

- les SLM à élastomère : le miroir métallique était déposé sur une couche de matériau élastomère déformable qui recouvrait les transistors d'actuation.
- les SLM à membrane : le miroir métallique repose sur une membrane suspendue sur les transistors d'actuation dont elle est séparée par un gap d'air et maintenue par des plots isolants.
- les SLM à poutre mono-encastree : chaque micro-miroir métallique est déposé sur une poutre mono-encastree dont la flexion est commandée par un transistor.
- les SLM à torsion : chaque micro-miroir est déposé sur une poutre bi-encastree dont la torsion est commandée par un transistor.

On peut comparer les différentes configurations possibles sur la figure ci-dessous (figure droite):

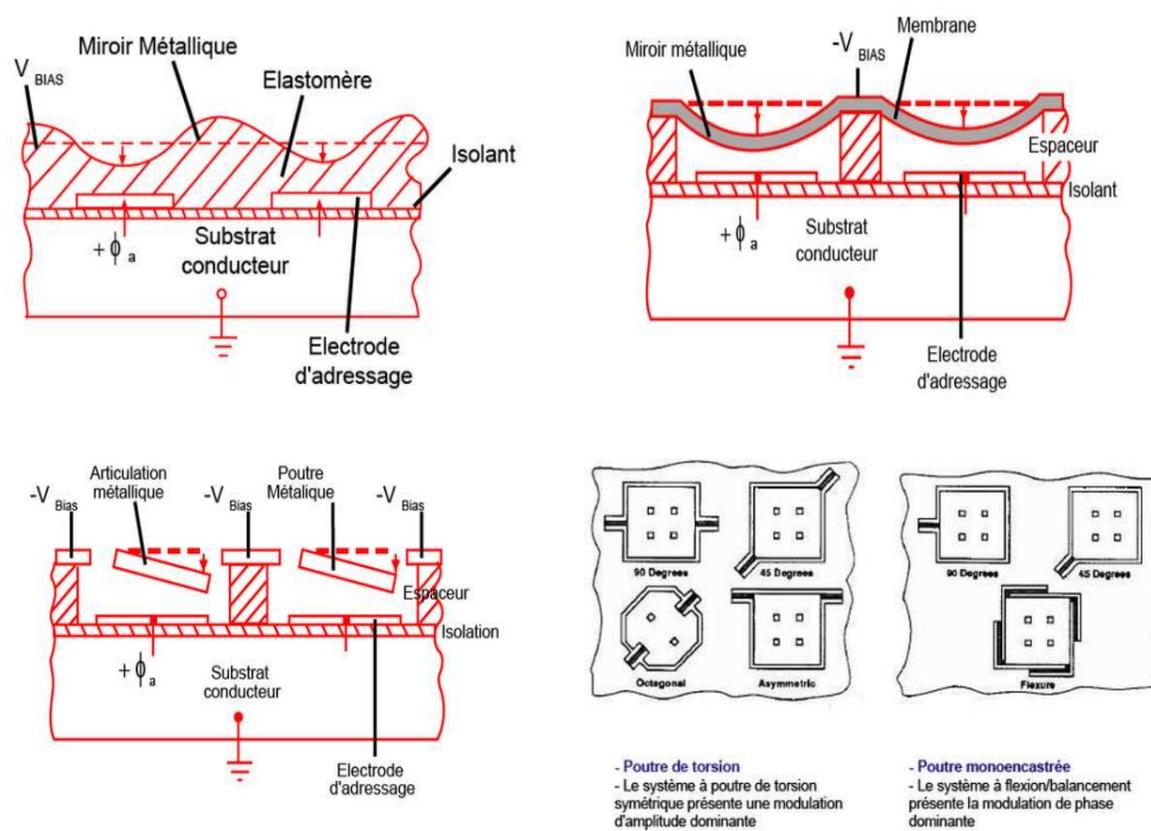
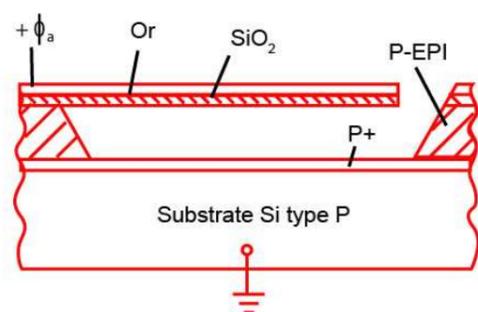


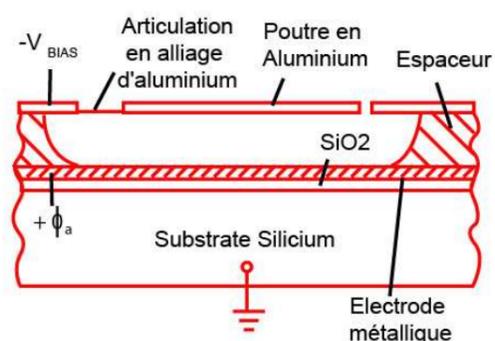
Figure 8 : Types de SLMs.

Dans les deux derniers cas, les miroirs ont été réalisés selon les dispositifs:

- soit par dépôt d'un film d'or sur des poutres de silice micro-usinée par gravure anisotrope humide (Fig. 9.a),
- soit par dépôt d'un film d'aluminium sur des poutres d'alliage d'aluminium micro-usinée par gravure plasma (Fig. 9.b).



(a) Poutre monoencastrée réalisée par gravure humide anisotrope



(b) Poutre monoencastrée réalisée par centrifugation sur un espaceur et gravure plasma

Figure 9 : Technologie des SLM à poutre encastrée.