

## Chapitre 3 Etude des capteurs à base de MEMS et leurs applications

### 1. Introduction

Les MEMS, acronyme de « *Micro Electro Mechanical Systems* », sont des dispositifs miniaturisés combinant plusieurs principes physiques. Ils intègrent généralement des éléments mécaniques couplés à de l'électronique et sont réalisés par des procédés de fabrication issus de la micro-électronique. Les MEMS exploitent, entre autres, des effets liés à l'électromagnétisme, la thermique et la fluïdique. Ils sont dans notre quotidien, au cœur de la téléphonie, de l'automobile, du médical, des chaînes de production ou des manettes de consoles de jeux.

Leur taille est de l'ordre du millimètre carré. Dans la figure 1, une comparaison d'une structure MEMS à la tête d'un crayon saut à l'oeil. Les éléments mécaniques des structures MEMS sont à l'échelle du micron ; à titre de comparaison, le diamètre moyen d'un cheveu est  $75\ \mu\text{m}$  et un globule rouge a une taille de  $7\ \mu\text{m}$ .

Utilisé en tant que capteur, un MEMS possède une partie mobile sensible à la variation d'une grandeur physique (vitesse, pression, direction ...). Cette variation est alors traduite en une grandeur électrique, analysée ensuite par la partie électronique du MEMS. Il possède parfois un micro-actionneur intégré qui, à partir d'un signal électrique, va agir sur la partie mécanique.

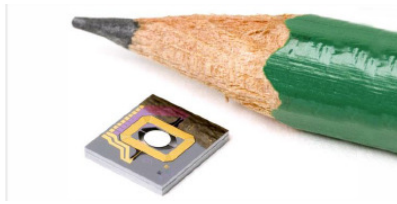


Figure 1 Visualisation de l'échelle d'une structure MEMS.

### 2. Besoin à la miniaturisation

L'utilisation de microsystèmes s'est développée du fait de leur faible encombrement parallèlement à une forte sensibilité et une grande précision liées à la miniaturisation. Les critères de poids, taille et volume ont permis leur généralisation dans des objets qui se devaient légers et/ou petits (automobile, avionique). Embarqués dans un véhicule, ils ne déprécient pas les efforts de poids et de consommation énergétique réalisés pour satisfaire les normes environnementales dans les domaines du transport. Les disques durs ont vu leur taille diminuer en même temps que leur densité de stockage augmentait, conséquences de la diminution de la taille des têtes de lecture-écriture. La miniaturisation des systèmes MEMS comme dans le domaine des capteurs s'est répercutée par l'ajout de fonctions qui n'auraient pas été possibles sans les critères d'encombrement, de coût de production et de consommation énergétique à l'usage.

### 3. Production des MEMS

Les étapes de fabrication des technologies MEMS sont calquées sur celle de la production des circuits intégrés et s'appuient sur les procédés de photolithographie (insolation UV de résine photosensible). Des procédés de gravure et de structuration du silicium (substrat) ont été développés afin d'intégrer des fonctions mécaniques à des fonctions électriques ; ils ne sont pas développés dans cette ressource.

#### 3.1. Photolithographie : permet la délimitation des zones accessibles à la gravure et des zones non accessibles.

- 3.2. **Lithographie** est une technique d'impression créée à la fin du 18e siècle par Aloys Senefelder. Du grec lithos (pierre) et graphein (écrire) le principe est de reporter sur une pierre calcaire plane un motif à l'aide d'un mélange gras (cire, suif et noir de fumée). La pierre est ensuite passée à l'eau forte (acide nitrique en solution aqueuse) le gras du motif repousse la solution, il sert de masque à l'attaque de la pierre. Le motif est alors en relief et une fois encré peut être imprimé. La technique évolue ensuite tout le long du 19e siècle passant de la pierre, à la plaque de cuivre ou de zinc, les techniques du report de motif et de sa gravure s'industrialisent.



Figure 2. Lithographie polychrome : une impression par couleur donc une pierre par couleur.

- 3.3. **Procédé de photolithographie** est employé pour la première fois par l'inventeur de la photographie Nicéphore Niepce vers 1815. Il permet le report d'une épreuve photographique sur une pierre lithographique. Celle-ci est recouverte d'une couche fine d'une émulsion sensible. Le négatif de la photographie est posé sur la surface séchée, puis lesté par une plaque de verre. L'ensemble est exposé à la lumière pendant quelques heures, les zones sombres du négatif protègent l'émulsion. Toutes ces parties non exposées sont ensuite dissoutes mettant à nu la pierre qui est ensuite attaquée par le mordant. Toute l'émulsion est ensuite évacuée avant encrage et impression. Le négatif a servi de masque pour délimiter les zones.
- 3.4. **Photolithographie dans la production des MEMS** découle des mêmes principes à des échelles micrométriques. Sur le substrat est déposée une couche de résine photosensible, puis le masque comportant le motif est posé comme il est montré dans les figures 3 et 4. Dans la figure 5, une insolation est réalisée sur l'ensemble. La zone insolée voit sa solubilité augmenter ou diminuer selon qu'elle est positive ou négative. La figure 6 montre l'élimination de la résine soluble, le substrat est alors mis à nu selon les zones choisies et peut alors subir les traitements suivants comme la gravure, des dépôts, etc.

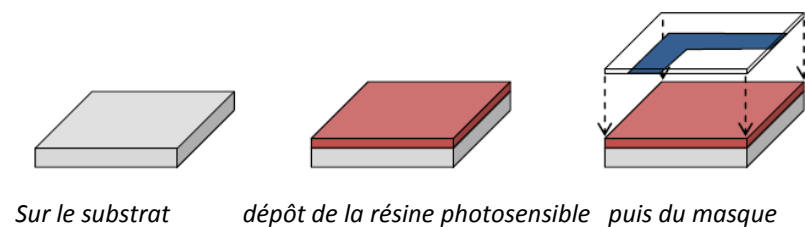


Figure 3.

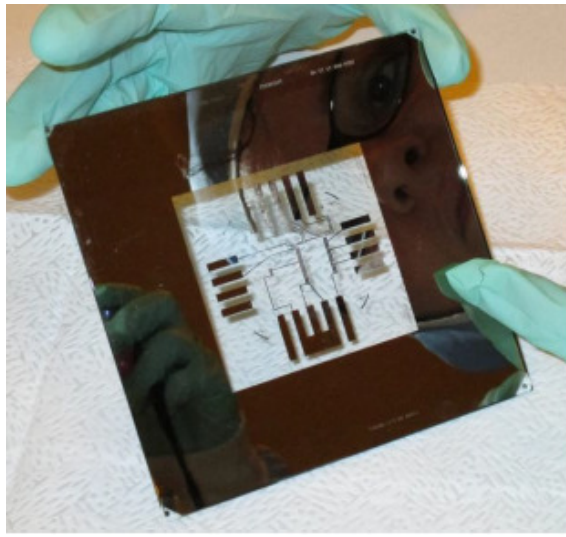


Figure 4. Exemple de masque utilisé en recherche en laboratoire. Les motifs ont une précision inférieure au micromètre.

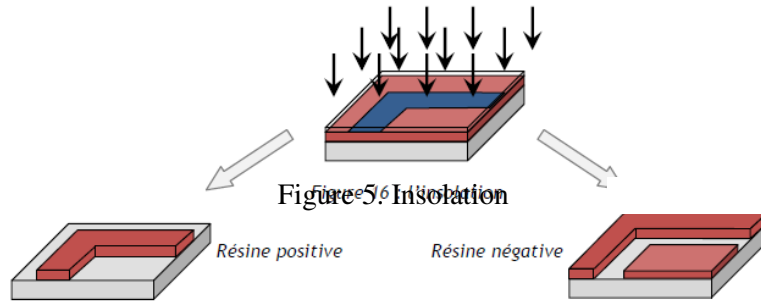
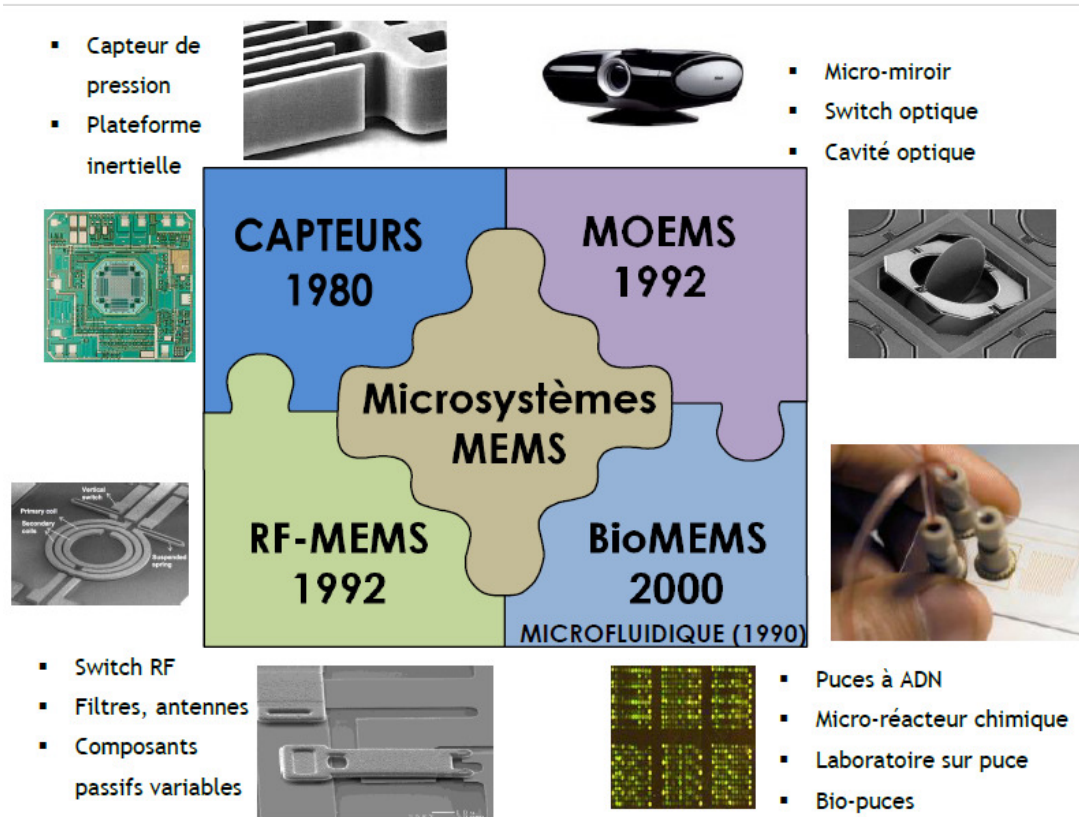


Figure 6. Révélation par dissolution en fonction du type de résine

#### 4. Différents domaines d'application des MEMS

Les avancées autour de la micro-technologie de réalisations des MEMS (basées sur le principe de la photolithographie) ont engendré une explosion des applications et une segmentation du domaine. On trouve quatre familles associées à leurs cadres applicatifs comme le montre la figure 7.



domaines d'applications des MEMS

Figure 7. Les quatre

## 5. Capteurs MEMS

Ils mettent en lien direct une déformation mécanique avec une variation électrique. On trouve par exemple des capteurs de pression (de type résistif) pour la surveillance de pneumatiques ou encore des chauffe-eaux, des capteurs d'accélération (de type capacitif) dans les airbags, la téléphonie portable, ou les manettes de consoles de jeux.

## 6. MEMS Optiques (MOEMS)

Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems, permettent la manipulation d'une information lumineuse ou électromagnétique. Les MOEMS sont désormais omniprésents dans les vidéoprojecteurs où des millions de miroirs (de quelques microns chacun) définissent chaque pixel de l'image (technologie DMD : Digital Micromirror Device ou encore DLP : Digital Light Processor).

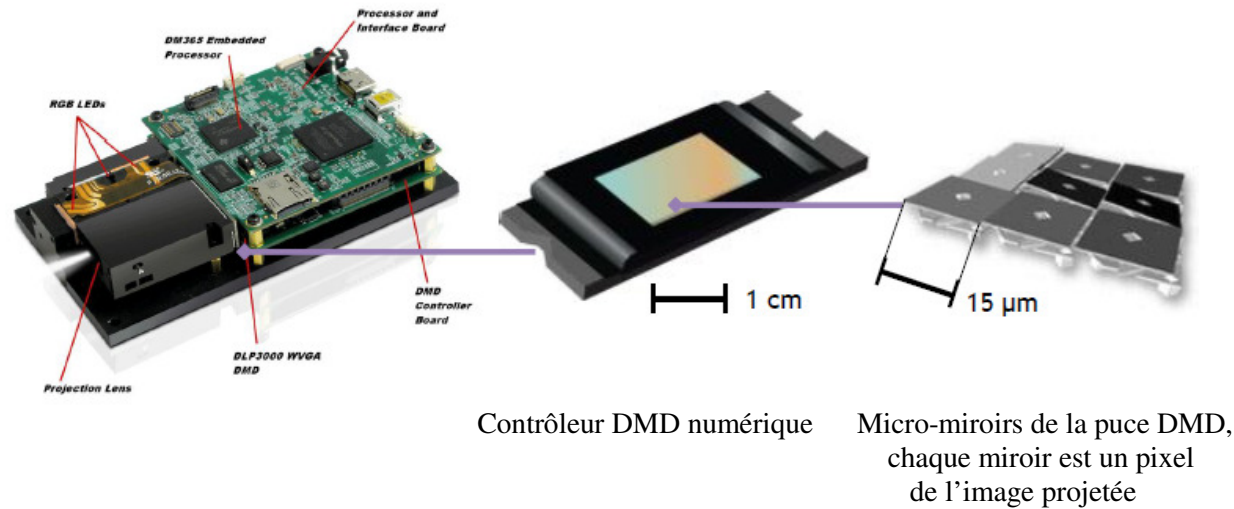


Figure 8. Vidéoprojecteur DLP.

## 7. Les MEMS RF

Ils trouvent leurs applications dans l'ensemble de la chaîne d'émission-réception d'un signal informatique. Les systèmes de communication sans fils utilisent des technologies MEMS RF, dispositifs micro-ondes avec une compacité importante, à consommation faible pour des performances RF sur une bande large.

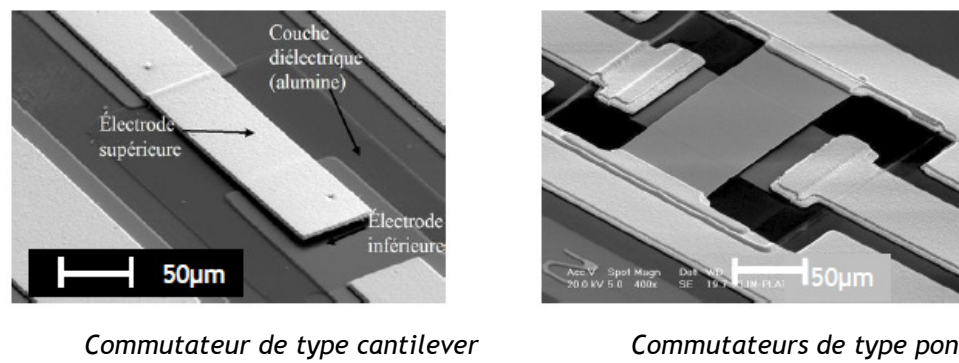


Figure 9. Composants MEMS RF

## 8. BioMEMS

Ils sont associés au laboratoire sur puce (LOC : Lab On Chip) ils permettent de développer des applications permettant d'interagir avec le vivant que ce soit à l'échelle des protéines (quelques nanomètres) à l'échelle cellulaire (quelques dizaines de microns) ou encore à l'échelle d'un tissu (quelques millimètres). Les BioMEMS intègrent des réseaux de micro-canaux où sont gérés les écoulements microfluidiques. Ils visent l'intégration de l'ensemble des étapes d'un protocole biologique sur un système miniaturisé de la taille typique d'une carte de paiement. On les retrouve sous l'application biopuces.

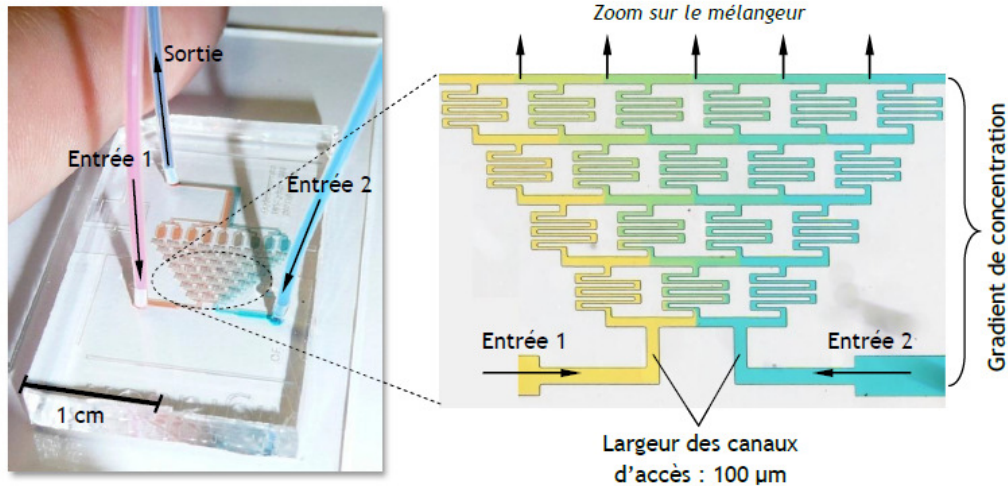


Figure 10. Générateur de gradient.

### 9. Principe d'un capteur résonant

Les capteurs MEMS possèdent une structure (voir ressource « MEMS : contexte et applications ») dont une partie est mobile en lien avec la grandeur physique à mesurer : le mesurande. Les éléments mécaniques des MEMS (micro-membrane, micro-poutre ou micro-pont) sont réalisés à l'échelle micrométrique sur silicium dont les propriétés électriques (semi conducteur) mais aussi mécaniques sont alors exploitées. Une variation du mesurande détectée par les parties mobiles engendre une variation d'une grandeur électrique, image du mesurande qui via une chaîne de conditionnement restitue une mesure de tension. La figure 2 montre une chaîne de mesure et d'information d'une grandeur physique donnée.

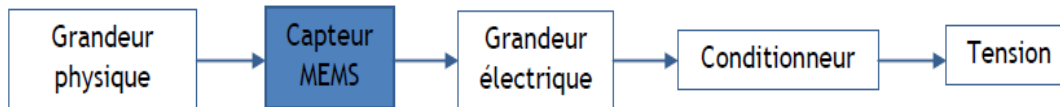


Figure 11. Chaîne de mesure et d'information.

Le principe d'un capteur résonant est la mise en oscillation de la structure mécanique dont la fréquence vibratoire est dépendante du paramètre à quantifier comme il est montré dans la figure 12.

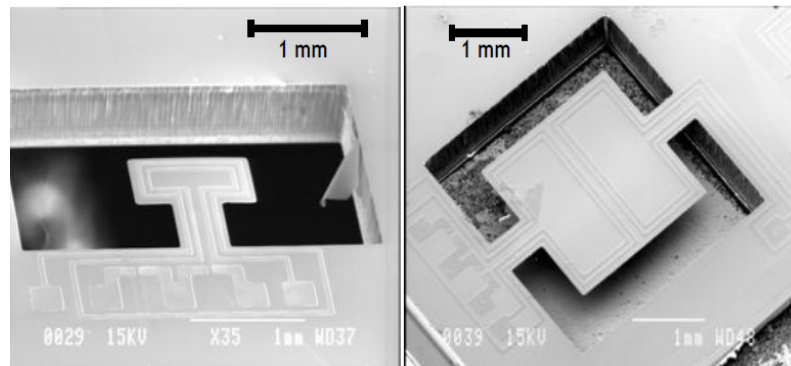


Figure 12. Exemple de structures mécaniques simples en poutre (à gauche) et pont (à droite).

Le principe de la mesure repose sur l'amplification du signal de sortie issu de la microstructure à l'aide d'une mesure de déplacement type piézorésistive ou capacitive afin de la réinjecter à l'entrée pour générer le mouvement via un micro-actionneur intégré au MEMS (type électrostatique ou magnétique). On rend le système instable pour qu'il fonctionne uniquement comme un oscillateur à la fréquence de résonance de la microstructure, figure 4. Un MEMS est instrumenté pour en faire une boucle d'asservissement instable dont la fréquence de sortie est définie par les caractéristiques mécaniques de la partie mobile.

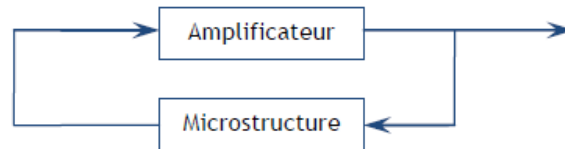


Figure 12. Schéma de la boucle

La sensibilité de ces systèmes est inversement proportionnelle à leur taille. La réduction des dimensions à l'échelle micrométrique de la structure mécanique mobile entraîne des fréquences de vibration d'autant plus hautes, ce qui rend ce principe largement utilisé lorsque la précision est le facteur contraignant de l'application.

Le premier capteur présenté exploite la fréquence de résonance d'une structure du type poutre mobile (capteur vibrant de masse), le second exploite la propagation d'une onde au sein d'un matériau piézoélectrique (capteur à ondes de surface SAW, Surface Acoustic wave).

**9.1. Capteur à poutre résonante pour la détection d'espèces**

Un capteur résonant de masse utilise la mesure de la fréquence (ou vibrométrie) afin d'en déduire une variation de masse sur la structure mécanique mise en vibration. En miniaturisant ce principe à l'aide des micro-technologies, il est possible de détecter la présence d'une molécule unique (type protéine) venant se poser sur la structure mobile.

Ce type de capteur peut être schématisé par une masse ( $M$ ) mise en vibration (représentant la partie mobile de la microstructure) reliée à la structure à l'aide d'un ressort (représentant la raideur  $k$  du matériau) et d'un amortissement (de coefficient  $c$ ). Comme expliqué plus haut, les microstructures sont insérées dans un système bouclé intégrant un actionneur et une détection de déformation pour reboucler le système. La dépendance de la fréquence de résonance vis-à-vis de paramètres physiques est montrée ci-dessous à partir d'un simple système masse/ressort non asservi, une masse sismique.

**9.1.1. Principe de la masse sismique (accéléromètre) :** sur la figure 13.a, la masse ( $M$ ) est à l'équilibre, cette position est une référence :  $x_0 = 0$ . Le ressort de raideur ( $k$ ) est ancré entre la masse ( $M$ ) et un support. Lorsque le système subit une accélération suivant la direction , notée , le ressort se comprime ou se détend générant un effort proportionnel au déplacement ( $\Delta x = x - x_0$ ) et à sa raideur ( $k$ ).

En appliquant le théorème de la résultante du principe fondamental de la dynamique à la masse en projection sur l'axe  $x$  et en négligeant l'amortissement (bilan des actions figure 13.b) on obtient :

$$\Sigma \vec{F}_{ext} \cdot \vec{x} = M \cdot \vec{a} \cdot \vec{x}$$

Soit  $-kx = M\ddot{x}$  ou encore  $M\ddot{x} + kx = 0$

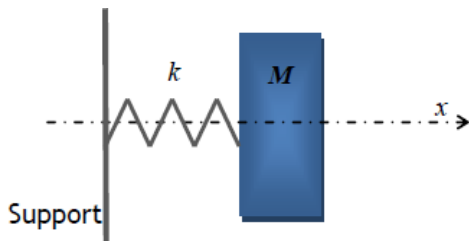


Figure 13.a. Schéma du système masse/ressort à l'équilibre

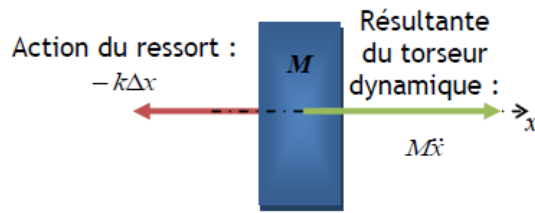


Figure 13.b. Bilan des actions mécaniques et accélération sur la masse isolée

Ce résultat montre que la mesure du déplacement ( $\Delta x = x - x_0$ ) permet de déterminer l'accélération subie puisqu'elle lui est directement proportionnelle, c'est le principe des accéléromètres MEMS :

$$\ddot{x} = \frac{k}{M} x$$

**9.2. Principe d'un capteur résonant :** Le système mécanique résonant intègre un actionneur qui agit sur le système via une force extérieure pour la mise en vibration. Sa modélisation reprend la masse ( $M$ ) associée à un ressort (raideur  $k$ ) auxquels on ajoute un amortissement (coefficient  $c$ ) comme le montre la figure 14. Il présente donc l'équation suivante :

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -F_x \quad \text{ou encore} \quad M \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = -F_x(t)$$

avec  $M$ , masse [kg],  $c$ , coefficient d'amortissement [N.m.s<sup>-1</sup>],  $k$ , raideur du ressort [N.m<sup>-1</sup>] et  $F_x$ , résultante des autres forces extérieures sur l'axe des  $x$ .

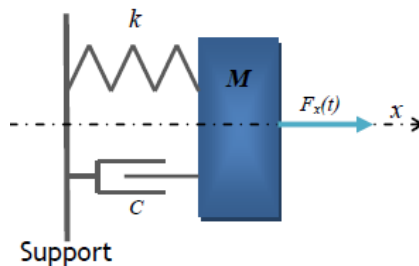


Figure 14. Schéma du système masse/ressort/amortisseur

En régime harmonique, la fréquence de résonance de structures  $f_r$  s'exprime proportionnellement à la raideur et à la masse :

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

Ainsi une variation relative de la masse  $\Delta M$  et/ou de raideur  $\Delta k$ , induira une variation de la fréquence selon la relation :

$$\frac{\Delta f}{f_r} = -\frac{\Delta M}{2M} + \frac{\Delta k}{2k}$$

La variation de la fréquence est bien caractéristique de la variation d'une grandeur physique. Une analogie peut être faite entre ce système mécanique et un circuit électrique résonant RLC série représenté dans la figure 16. La dérivée du déplacement selon l'axe  $x$  (la vitesse) est associée au courant électrique  $i$ , la masse  $M$  à une inductance  $L$ , le coefficient d'amortissement à une résistance  $R$ , et la raideur du ressort  $k$  à l'inverse de la capacité  $C$ . L'équation obtenue est caractéristique d'un circuit RLC série alimenté par une tension  $E(t)$  :

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i(t) dt = E(t)$$

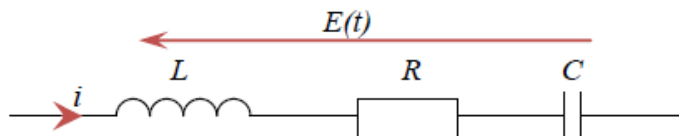


Figure 16 : Schéma électrique équivalent, RLC série

### 9.3. Capteur à ondes de surface (SAW : Surface Acoustic Wave)

Ces capteurs permettent la mesure de température, de pression ou de masse. Leur principe de fonctionnement repose sur la transmission par un substrat piézoélectrique d'une onde acoustique entre un émetteur et un récepteur. La variation dans la transmission des ondes signe la mesure. En rebouclant la réception de l'onde sur son émission, on obtient un résonateur. La fréquence de résonance va évoluer en lien avec le temps mis par l'onde pour parcourir la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Un capteur à onde acoustique montré dans la figure 17 est un résonateur composé de transducteurs interdigitaux (ou IDT pour Interdigital Transducer) qui permettent l'émission de l'onde et sa réception à travers un substrat piézoélectrique. L'effet piézoélectrique transforme l'énergie électrique d'alimentation du transducteur d'entrée en énergie mécanique. Pour obtenir une onde de surface, on périodise l'excitation. Sur le même principe, le transducteur de réception interdigité détecte l'onde à la surface du substrat et transforme l'énergie mécanique en énergie électrique mesurable.

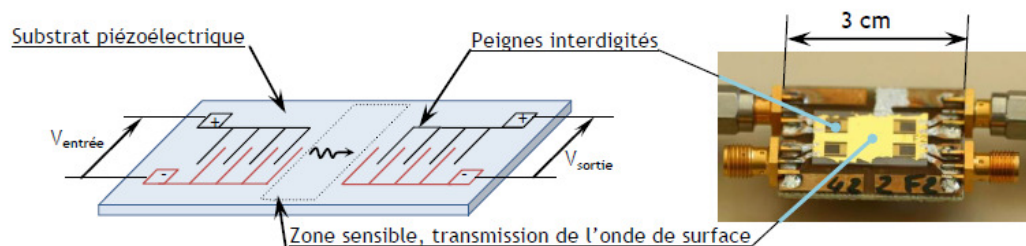


Figure 16. Schéma de principe d'un capteur à onde de surface, et photo d'une réalisation



En déposant une couche sensible sur le chemin de propagation de l'onde acoustique, on obtient un capteur résonant dont la fréquence est dépendante des évènements ayant lieu sur la couche (greffage de molécules par exemple) ou modifiant la vitesse de l'onde au sein même de la couche (mesure de température ou d'humidité).

La fréquence d'utilisation ( $f$ ) du capteur va être déterminée par la géométrie du peigne interdigité et la vitesse de propagation ( $v$ ) de l'onde acoustique au sein du matériau. L'excitation alternée du peigne (séquence de potentiel  $+V -V$ ) génère des ondes en phase si la périodicité de la géométrie ( $p$ ) est identique à la longueur d'onde ( $\lambda$ ) avec  $\lambda=v/f$  comme il est montré dans la figure 17.

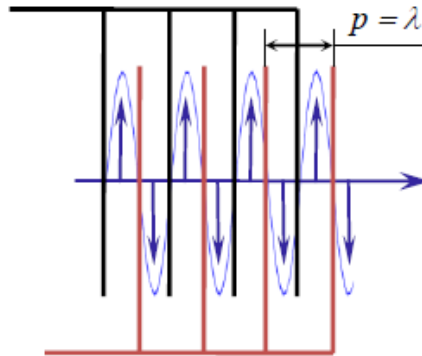


Figure 17. Schéma du peigne émetteur avec superposition de l'onde émise

Sur le capteur SAW de la figure 16, le substrat utilisé est du tantalate de lithium ( $\text{LiTaO}_3$ ) dont la vitesse de l'onde acoustique ( $v$ ) est de  $4160 \text{ m.s}^{-1}$ , la périodicité du peigne ( $p$ ) est de  $40 \mu\text{m}$ , ce qui donne une fréquence d'utilisation de  $104 \text{ MHz}$ .

Le temps de propagation de l'onde entre les 2 peignes est dépendant des propriétés du matériau et il est influencé par les paramètres externes (température, masse déposée sur la surface de propagation...) sur la longueur de la zone sensible. Ce changement décale la fréquence de l'oscillateur et permet la mesure.