

Introduction au diapason à quartz

par **Jean-Michel FRIEDT** et **Émile CARRY**

Association Projet Aurore

UFR-ST La Bouloie - 25000 Besançon

friedtj@free.fr

RÉSUMÉ

Nous proposons une introduction au diapason à quartz. Nous présentons dans un premier temps ce composant comme résonateur offrant une stabilité en fréquence acceptable pour la plupart des applications quotidiennes, puis présentons comment cette grande stabilité peut être utilisée dans une application capteur.

1. INTRODUCTION

Depuis la fin des années 1960, une nouvelle génération de montres - dites à quartz - a révolutionné la mesure du temps [1-2] en détrônant les montres à ressort mécanique ou à pendule. Plus stable, consommant peu de puissance, compact, le diapason à quartz qui forme le cœur de ces montres est depuis produit en très grandes quantités pour un coût ridiculement faible⁽¹⁾.

Nous avons présenté auparavant la microbalance à quartz [3], basée sur un résonateur piézoélectrique dans lequel le confinement d'une onde acoustique de cisaillement dans un disque de quartz (coupe AT) offre un dispositif avec un facteur de qualité de plusieurs milliers et permet donc la réalisation d'oscillateurs stables dans la région de quelques mégahertz.

Nous décrivons ici le diapason à quartz, résonateur à facteur de qualité élevé. Les applications technologiques de ce petit composant sont extrêmement larges et une bonne compréhension de son fonctionnement offre de vastes possibilités, tant dans le domaine des oscillateurs que dans celui des capteurs.

2. LE RÉSONATEUR

Le principe du diapason est bien connu des musiciens : deux barreaux sont connectés par une de leurs extrémités pour former un résonateur dont la fréquence de résonance est définie par les caractéristiques du matériau et la géométrie des barreaux. Alors qu'en première approximation chaque barreau peut être considéré individuellement pour déter-

(1) Référence 221533 chez FARNELL : 0,96 €/pièce.

miner analytiquement les fréquences de résonance disponibles, la combinaison de deux barreaux dans un diapason impose, de par ses conditions de symétrie, la sélection de quelques modes bien définis avec un bon facteur de qualité.

L'utilisation d'un substrat piézoélectrique permet de remplacer l'excitation mécanique du diapason (en le heurtant contre un objet dur) par une excitation électrique, la piézoélectricité définissant la propriété d'un matériau à convertir une différence de potentiel électrique en un déplacement mécanique et réciproquement, par déformation de la maille cristalline (condition d'asymétrie sur la maille).

La rigidité du quartz permet de confiner efficacement l'énergie acoustique dans les bras du diapason et de ce fait d'atteindre des facteurs de qualité de l'ordre de la dizaine de milliers pour une fréquence fondamentale sous vide de 32 768 Hz. Combinées à ses petites dimensions et sa faible consommation énergétique, ces propriétés font du diapason à quartz un des composants les plus utilisés en électronique lorsqu'une référence stable de fréquence est nécessaire (horloge, électronique numérique, synchronisation pour la communication...). Il est par conséquent produit à très faible coût, ce qui en fait un objet d'étude intéressant.

Extérieurement, le diapason à quartz se présente comme un petit cylindre métallique de 8 mm de hauteur et une base de 3 mm de diamètre contenant un dipôle. L'encapsulation du diapason s'ouvre facilement en serrant le cylindre dans une petite pince jusqu'à ce que la déformation du cylindre entraîne une rupture de son lien par pression avec la base. Alternativement, une méthode de décapsulation plus propre et plus reproductible développée plus loin consiste à découper le cylindre métallique au moyen d'une scie de modélisme.

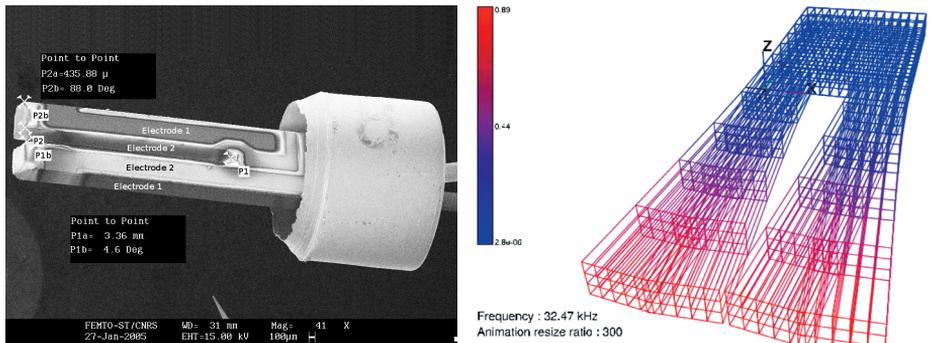


Figure 1 : *Gauche* : image au microscope électronique à balayage d'un diapason mettant en relief les électrodes. *Droite* : modélisation du déplacement à la résonance d'un diapason de $Q = 10000$ sous une tension de 0,5 V (logiciel de simulation développé par l'équipe de S. BALLANDRAS, LPMO - Besançon).

La figure 2 (droite) présente un diapason décapsulé et le boîtier métallique qui le maintient normalement sous vide. La figure 1 présente une image obtenue au microscope électronique à balayage et inclut quelques dimensions fondamentales pour les considéra-

tions de modélisation qui vont suivre, ainsi que le mode de flexion fondamental de vibration modélisé par éléments finis. Cette modélisation a été effectuée pour une analyse ultérieure incluant une pointe collée à un des bras du diapason. Une étude analytique préliminaire qui ne nécessite pas la maîtrise de tels outils logiciels est possible en supposant que chaque bras du diapason se comporte comme une poutre encastree [4-5]. La pulsation ω_1 du premier mode de résonance (où le couplage entre les deux bras n'intervient pas)

est alors résolue numériquement pour donner la formule approchée : $\omega_1 = \frac{1,76 \times a}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

avec $l \simeq 3,2$ mm la longueur des bras du diapason, $a \simeq 0,33$ mm leur épaisseur, $E \simeq 10^{11}$ N/m² le module de Young du quartz et $\rho = 2650$ kg/m³ sa masse volumique⁽²⁾. L'application numérique donne une fréquence de résonance fondamentale de l'ordre de 32 kHz.

Un aspect que nous avons passé sous silence dans notre discussion antérieure de la microbalance à quartz est la notion de rotation de coupe. Le quartz étant un matériau anisotrope, la position des électrodes sur le substrat piézoélectrique définit la direction de déformation mécanique induite par le champ électrique appliqué et donc le type d'onde acoustique générée. Dans le cas de la microbalance, la coupe dite AT permet de générer une onde transverse de volume par l'application d'un champ électrique normal aux surfaces du substrat avec la propriété fondamentale d'un coefficient de fluctuation de la fréquence avec la température nul autour de 20 °C. Dans le cas du diapason, les électrodes de polarités opposées sont déposées sur les côtés adjacents des bras du diapason, et le champ ainsi créé induit un mouvement de flexion des bras dans le plan du diapason (cf. figure 1, droite). Le diapason est usiné (par méthodes lithographiques telles qu'utilisées dans l'industrie électronique) dans une galette (*wafers*) de quartz de quelques centaines de micromètres d'épaisseur de coupe Z (*i.e.* la normale à la galette définit l'axe c du cristal de quartz), et les bras du diapason sont orientés selon l'axe Y [6] tel qu'illustré sur la figure 1.

Ce choix de coupe et la définition de la disposition des électrodes sur chaque barreau sélectionnent les modes de vibration autorisés. Le choix de la géométrie des bras définit la fréquence de résonance. Plusieurs géométries permettent d'atteindre la fréquence habituellement recherchée, 32 768 Hz. Cette fréquence, égale à 2^{15} , facilite la génération d'un signal à 1 Hz par une chaîne de diviseurs par deux de fréquence, objectif recherché pour les applications horlogères. De plus, le mode suivant le plus proche susceptible de produire une oscillation se trouve à 191 kHz, suffisamment loin du mode fondamental pour être aisément séparé par l'électronique d'entretien des oscillations.

3. ASPECT OSCILLATEUR

3.1. Les modèles mécanique et électrique

Comme pour la microbalance à quartz [3], le diapason peut être modélisé avec les

(2) <http://www.ieee-uffc.org/freqcontrol/quartz/fc>

mêmes analogies par un circuit RLC série représentant les caractéristiques mécaniques de l'oscillateur amorti, en parallèle avec une capacité représentant la composant électrique provenant du diélectrique (le quartz) situé entre les électrodes polarisant le diapason (modèle dit de Butterworth-Van Dyke). Le facteur de qualité sous vide est typiquement de quelques dizaines de milliers. Dans l'air, le facteur de qualité chute à quelques milliers du fait de l'interaction visqueuse avec le gaz (cf. figure 2, gauche). Le diapason est peu approprié au fonctionnement en milieu liquide : en effet, le mouvement de bras génère des ondes longitudinales dans le liquide qui emporte l'énergie emmagasinée par le diapason et fait par conséquent chuter le facteur de qualité à quelques unités. De plus, les deux électrodes (l'une à la masse et l'autre polarisée) sont nécessairement en contact avec le liquide, induisant des réactions électrochimiques en présence de solutions fortement ioniques.

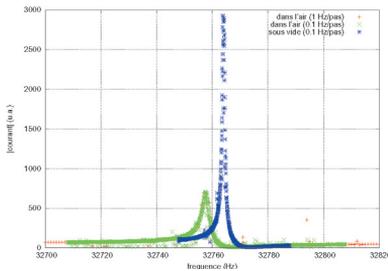


Figure 2 : *Gauche* : mesure du courant traversant un diapason encapsulé puis décapsulé en fonction de la fréquence : on observe la résonance suivie de l'antirésonance en amplitude. Noter la chute du maximum du signal et l'élargissement du pic dus aux frottements visqueux avec l'air une fois le diapason décapsulé. *Droite* : un résonateur, monté sur une perceuse de modélisme, vient d'être décapsulé.

3.2. Caractérisation électrique du résonateur

Comme tout résonateur dont les variations de caractéristiques sont observées en fonction de l'environnement (en temps que capteur), deux modes de fonctionnement existent : en oscillateur lorsque le résonateur est inclus dans une boucle fermée dont le gain compense les pertes (et vérifiant les conditions de phase appropriées dites de Barkhausen [7]), ou en boucle ouverte avec une étude du comportement en fonction de la fréquence avec un analyseur d'impédance. Ce dernier instrument étant coûteux et généralement inaccessible, nous avons réalisé un montage à base d'un synthétiseur de fréquence discret que nous allons décrire ici.

Nous allons justifier avant tout notre choix de travailler par la suite en boucle ouverte (mesure d'impédance du diapason par une source sinusoïdale externe) plutôt qu'en incluant le diapason dans un oscillateur. Un montage oscillateur à 33 kHz stable est relativement simple à réaliser, par exemple au moyen d'un circuit intégré dédié à cette application : le 4060⁽³⁾. Cependant, les perturbations au diapason dans les aspects capteur qui vont nous intéresser par la suite sont relativement faibles, et le déphasage observé à la fréquence de

(3) <http://www.fairchildsemi.com/ds/CD/CD4060BC.pdf>

résonance lorsque le diapason est perturbé par une force externe est de l'ordre de 10° . Or nous savons [8] que pour un résonateur de facteur de qualité Q et de fréquence de résonance f_0 , la variation de fréquence Δf induite par une variation de phase $\Delta\varphi$ est $\Delta\varphi = -2Q \frac{\Delta f}{f_0}$ soit dans le cas qui nous intéresse avec $f_0 \simeq 32\,768$ Hz et $Q \simeq 10^3$ (diapason dans l'air, cf. figure 2 à gauche), une variation de fréquence de l'ordre de 2 à 3 Hz est attendue. Cette variation de fréquence est aisément mesurable avec du matériel spécialisé, mais nécessite une réalisation soignée si un compteur de fréquence à base de composants discrets doit être réalisé pour les expériences qui seront décrites ici. Une telle réalisation dépasse le cadre de cet article. Nous allons donc présenter un montage de génération de sinusoïde stable pour interroger l'amplitude de vibration du diapason.

Un synthétiseur de fréquence est un composant numérique qui, à partir d'une horloge stable (généralement un oscillateur à quartz de fréquence élevée) à fréquence f_c , est capable de générer toutes les fréquences de 0 à $f_c/3$ par pas de $f_c/2^{32}$ dans le cas de l'AD9850 de Analog Devices (compteur sur 32 bits : cf. figure 3). La sinusoïde calculée numériquement est convertie en tension de sortie par le composant au moyen d'un étage de sortie convertisseur numérique-analogique rapide. Une telle stabilité et résolution sont nécessaires pour l'étude du diapason à quartz dont la fréquence modeste (autour de 32 768 Hz) d'étude doit être générée de façon très stable du fait du facteur de qualité élevé : une résolution et stabilité de 0,1 Hz sont nécessaires pour définir avec une précision suffisante la fréquence de travail dans les études qui suivent.

Le synthétiseur de fréquence excite le dipôle qu'est le diapason. L'impédance de ce dernier chute à la résonance et nous mesurons le courant traversant le dipôle au moyen d'un convertisseur courant-tension à base d'amplificateur opérationnel (TL084). L'amplitude de la tension issue de l'étage de conversion courant-tension est mesurée par redressement et filtrage passe-bas avec une fréquence de coupure inférieure à 3 kHz (cf. figure 3, droite).

Les diagrammes expérimentaux d'un résonateur sous vide et décapsulé (à l'air) sont présentés sur la figure 2. Dans un premier temps, nous observons dans les deux cas une résonance en courant (maximum du courant) suivi d'une antirésonance (minimum du courant) caractéristique d'un modèle comprenant un circuit RLC série (branche acoustique) en parallèle avec une capacité (branche électrique). Deux différences sont observées entre les courbes obtenues sous vide et dans l'air : la fréquence de résonance et le maximum d'intensité décroissent lorsque le diapason est placé dans l'air, et le facteur de qualité chute. Ces effets sont attribués aux effets visqueux de l'air sur les bras du diapason en vibration : la génération d'ondes de compression dans l'air dissipe de l'énergie du résonateur et fait par conséquent baisser le facteur de qualité (défini comme le rapport de l'énergie emmagasinée dans le résonateur sur l'énergie dissipée à chaque oscillation). Le facteur de qualité est de l'ordre de 10 000 sous vide et de l'ordre de 1 000 dans l'air. La fréquence de résonance baisse de 32 768 Hz sous vide à 32 755 Hz dans l'air soit une variation de 400 ppm.

4. ASPECT CAPTEUR

Comme dans tous les cas où un signal stable relativement insensible à son environnement peut être obtenu, nous pouvons nous interroger sur la façon dont la géométrie du résonateur peut être perturbée pour en faire un capteur sensible. Dans le cas du diapason, la solution consiste à fixer mécaniquement sur un des bras une sonde sensible à la force à mesurer.

L'application de cette force perturbe la fréquence de résonance du diapason qui peut par la suite être mesurée avec une grande précision pour obtenir un capteur sensible. La sonde peut être une pointe vibrant au-dessus d'une surface dont la topographie est imagée pour donner la classe des microscopes à sonde locale à force de cisaillement (*shear-force microscope*) [6], mesure de topographie qui peut éventuellement être combinée avec la mesure d'autres grandeurs physiques [9] telles que la force électrostatique [10], magnétique [11] ou le champ évanescent optique (SNOM) [12].

4.1. Capteur de force

Nous avons vu plus haut que du fait de l'axe de vibration des bras du diapason avec une composante du déplacement normale à une des faces des bras, une partie de l'énergie emmagasinée par le résonateur est dissipée à chaque oscillation dans le milieu visqueux qui l'entoure et fait ainsi chuter le facteur de qualité et donc la sensibilité. Cela exclut toute utilisation du diapason à quartz comme capteur de masse de type microbalance en milieu liquide.

Nous avons tenté de fixer en bout du diapason de la limaille de fer pour en faire un magnétomètre [13]. Cette expérience n'a pas donné de résultats satisfaisants car :

- ◆ Le collage de la limaille de fer est peu reproductible : les masses de colle et de limaille n'étant pas contrôlables, il nous a été impossible d'obtenir de façon reproductible des conditions de résonance nettes pour une mesure fiable. De plus, la force exercée par la limaille de fer sur les bras dépend de la masse de fer qui doit être contrôlée au moment du collage.
- ◆ La force magnétique variant en $1/r^3$ est de courte portée et donc particulièrement difficile à mesurer.

4.2. Profilométrie

À titre d'illustration de l'utilisation d'un diapason comme sonde de distance à une surface, nous allons réaliser un modèle de microscope à force transverse (*shear force microscope*) où la perturbation de la fréquence de résonance du diapason nous informe de la présence d'une surface à proximité d'un bras du résonateur. Dans les applications pratiques où une excellente résolution spatiale est recherchée, une pointe est collée en bout de diapason. Ce raffinement est trop complexe à mettre en œuvre dans le montage grossier que nous proposons ici, et nous allons donc directement utiliser un coin du diapason comme sonde en contact avec la surface à analyser.

Le montage expérimental est très similaire à celui présenté antérieurement [14] :

- ◆ le diapason est mis en oscillation à sa fréquence de résonance (maximum d'amplitude du courant) et fonctionne toujours à cette fréquence fixe ;
- ◆ le diapason est monté sur un actuateur permettant de faire varier sa distance à une surface à analyser (direction dite « Z ») : un haut-parleur de 70 mm de diamètre et d'impédance 8Ω (récupéré sur un PC) est commandé *via* un transistor amplificateur de courant par un convertisseur numérique-analogique (DAC) tel que décrit sur la figure 3 (droite) ;
- ◆ la relation entre le signal d'amplitude du courant traversant le diapason en vibration et la distance à la surface est mesurée : nous constatons qu'elle est bijective (*cf.* figure 4, gauche) mais présente une hystérésis ;
- ◆ l'échantillon est monté sur le porte-stylo d'une table traçante commandée par ordinateur (port RS232) pour balayer la surface et mesurer la distance sonde-échantillon en un grand nombre de points distincts dans l'espace et ainsi reconstituer la topographie de l'échantillon (dans notre cas une pièce de monnaie).

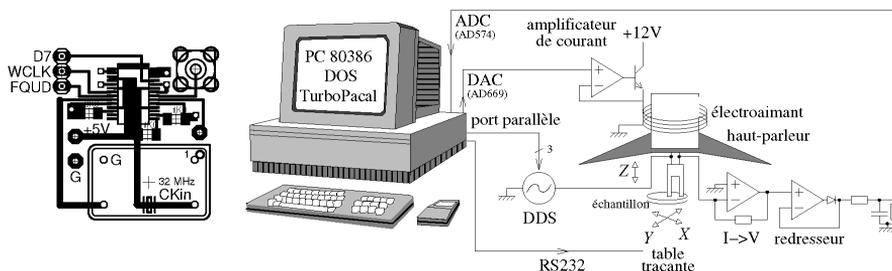


Figure 3 : Schéma du montage expérimental avec le schéma de connexion du synthétiseur de fréquence AD9850. Noter les deux résistances de $1 \text{ k}\Omega$ sur les sorties : elles sont toutes deux nécessaires pour obtenir un signal en sortie, même si une seule des deux sorties est utilisée. Les points de connexion D7, WCLK et FQUD sur le circuit imprimé de gauche sont connectés au port de données sur port parallèle d'un PC, respectivement aux broches 2, 3 et 4. Toute la face inférieure de ce circuit double-face est couverte de cuivre à la masse.

Le principe de mesure est le suivant : pour chaque point, l'amplitude de vibration du diapason est mesurée, et le courant circulant dans la bobine du haut-parleur est ajusté (DAC) jusqu'à ce que le diapason interagisse avec la surface et que son amplitude d'oscillation atteigne la consigne définie dans la région où la relation signal (amplitude du courant)-distance est la plus pentue. La valeur de DAC qui a permis de vérifier cette condition est alors enregistrée et la table traçante déplace l'échantillon sous le diapason pour la mesure au point suivant. L'asservissement sur l'amplitude [15] est moins sensible que l'asservissement sur la phase entre le courant circulant dans le diapason et la tension d'excitation, mais cette dernière est plus complexe à mesurer et nécessite le réglage d'un circuit électronique additionnel [16]. Deux solutions sont retenues sans être implémentées ici : soit le passage après saturation par un comparateur des signaux de tension et de courant dans une porte XOR (« ou exclusif ») dont le rapport cyclique du signal de sortie

est fonction de la phase entre les deux signaux ; ou la multiplication (au moyen d'un AD633) des deux signaux de courant et de tension suivis d'un filtre passe-bas (seule la composante en cosinus de la phase restant en sortie, en supposant que l'amplitude des deux signaux d'entrée est constante ce qui nécessite un contrôle de gain automatique sur le signal de courant issu du diapason).

Nous constatons sur la photo de la figure 4 (droite) que le diapason est en fait penché par rapport à la normale à la pièce et le mouvement des bras n'est pas parallèle à la surface analysée : l'interaction entre le bras du diapason en contact avec la surface est plutôt du type tapotement intermittent (*tapping mode*) [17-18] que de type force transverse.

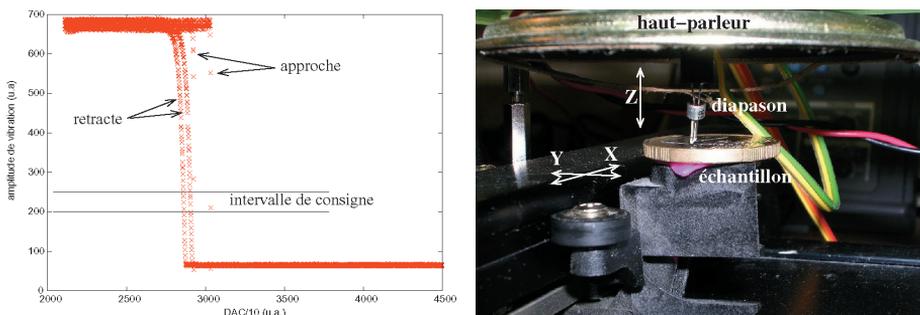


Figure 4 : Gauche : relation signal distance diapason-surface. Droite : photo du montage expérimental. Noter que seul le coin du diapason est en contact avec l'échantillon pour une meilleure résolution spatiale.

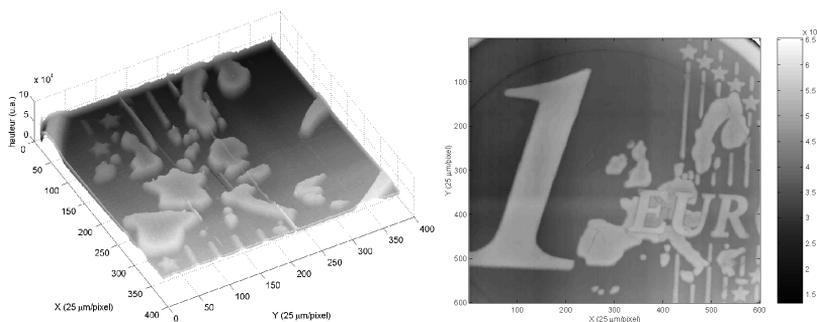


Figure 5 : Gauche : topographie d'une pièce de vingt centimes d'euro. Droite : topographie d'une pièce d'un euro.

CONCLUSION

Nous avons présenté le diapason à quartz, dipôle électronique fondamental dans toutes les applications nécessitant une référence de temps précise. Nous avons dans un premier temps présenté son principe de fonctionnement comme résonateur encapsulé sous vide à coefficient de qualité très élevé. Nous avons ensuite illustré l'utilisation de

ce résonateur comme capteur en développant l'instrumentation de mesure de ses propriétés électriques (synthétiseur de fréquence stable et précis) et en incluant le résonateur décapulé dans un montage de profilométrie. La force d'interaction entre le diapason et la surface sondée influe sur le courant circulant dans le diapason en perturbant la fréquence de résonance du bras en contact avec l'échantillon et permet ainsi un asservissement de la distance diapason-échantillon pour une mesure précise de la topographie, indépendamment des autres propriétés physiques (conductivité, réflectivité, ...) de la surface analysée.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] FORRER M.P. *A flexure-mode quartz for an electronic wrist- watch*. Proceedings of the 23rd ASFC, 1969, p. 157-162.
- [2] YODA H., IKEDA H. & YAMABE Y. *Low power crystal oscillator for electronic wrist watch*. Proceedings of the 26th ASFC, 1972, p. 140-147.
- [3] FRIEDT J.-M. Introduction à la microbalance à quartz : aspects théoriques et expérimentaux. *Bull. Un. Phys.*, mars 2003, vol. 97, n° 852, p. 429-440.
- [4] SOUTIF M. *Vibrations, propagation, diffusion*. Dunod Université, 1982, p. 196.
- [5] LANDAU L. & LIFCHITZ E. *Théorie de l'élasticité*. Éditions Mir, 1967, p. 149 ou members.iinet.net.au/fotoplot/accqf.htm
- [6] KARRAI K. & GROBER R.D. Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes. *Appl. Phys. Lett.*, 3 avril 1995, **66**, 1842 - disponible à : <http://www2.nano.physik.uni-muenchen.de/karrai/publications.html>
- [7] La somme des phases des éléments de la boucle de l'oscillateur - résonateur + amplificateur + déphase - doit être multiple de 2π ,
cf. <http://www.rubiola.org/talks/leeson-effect-talk.pdf>
- [8] AUDOIN C. & GUINOT B. *The measurement of time - Time, frequency and the atomic clock*. Cambridge University Press, 2001, p. 86, (ouvrage traduit du français, disponible chez Masson (1998)).
- [9] GIESSIBL F.J. High-speed force sensor for force microscopy and profilometry utilizing a quartz tuning fork. *Appl. Phys. Lett.*, 28 décembre 1998, **73**, 26, 3956.
- [10] SEO Y., JHE W. & HWANG C.S. Electrostatic force microscopy using a quartz tuning fork. *Appl. Phys. Lett.*, 10 juin 2002, **80**, 23, 4324.
- [11] TODOROVIC M. & SCHULTZ S. Magnetic force microscopy using nonoptical piezoelectric quartz tuning fork detection design with application to magnetic recording studies. *Journal of Applied Physics*, 1^{er} juin 1998, **83**, 11, 6229.
- [12] POHL D.W., DENKT W. & LANZ M. Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$. *Appl. Phys. Lett.*, 1^{er} avril 1984, 44, 7, 651.
- [13] TODOROVIC M. & SCHULTZ S. Miniature high-sensitivity quartz tuning fork alternating gradient magnetometry. *Appl. Phys. Lett.*, 14 décembre 1998, **73**, 24, 6229.

- [14] FRIEDT J.-M., LE MASNE Q., COQ N. et MYOTTE M. Réalisation d'un profilomètre optique : introduction à la microscopie à sonde locale. *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, février 2004, vol. 98, n° 861, p. 265-277.
- [15] HSU J.W.P., MCDANIEL Q.Q. & HALLEN H.D. A shear force feedback control system for near-field scanning optical microscopes without lock-in detection. *Rev. Sci. Instrum.*, août 1997, **68**, 8, 3093.
- [16] STARK M. & GUCKENBERGER R. Fast low-cost phase detection setup for tapping-mode atomic force microscopy. *Rev. Sci. Instrum.*, septembre 1999, **70**, 9, 3614.
- [17] EDWARDS H., TAYLOR L., DUNCAN W. & MELMED A.J. Fast, high-resolution atomic force microscopy using a quartz tuning fork as actuator and sensor. *Journal of Applied Physics*, 1^{er} aout 1997, **82**, 3, 980.
- [18] TSAI D.P. & LU Y.Y. Tapping-mode tuning fork force sensing for near-field scanning optical microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 9 novembre 1998, **73**, 19, 2724.



Jean-Michel FRIEDT
Chercheur post-doctorant
Laboratoire de Microanalyse Nucléaire
Besançon (Doubs)



Émile CARRY
Profession
Adresse 1
Adresse 2