

Cet examen comprend 10 questions sur un total de 20 points.

Les microscopes à force atomique (AFM : Atomic Force Microscope) sont issus d'un travail initial de Bining et Rohrer (cf. Fig. 1) sur le concept de sonde locale (Scanning Probe Microscope). En 1986, la communauté scientifique reconnaissait l'importance de leur travail sur le microscope



FIGURE 1 – Binning et Rohrer avec leur prix Nobel (image IBM)

à effet tunnel datant de 1982 (Scanning Tunneling Microscope) permettant des mesures d'objets de quelques nanomètres en leur attribuant le prix Nobel de Physique. Nous nous proposons dans la suite de ce document d'étudier de façon très simpliste un des éléments clef du microscope à force atomique. C'est élément appelé "poutre" (cantilever) porte à son extrémité une sonde (tip) dont la section s'amenuise en s'éloignant de la poutre pour finir en une pointe de la taille des objets à mesurer (cf. Fig. 2). Dans la suite de cet examen, bien que les efforts soient transmis par la sonde, nous nous intéresserons uniquement à la poutre et à ses déformations en flexion et en torsion.

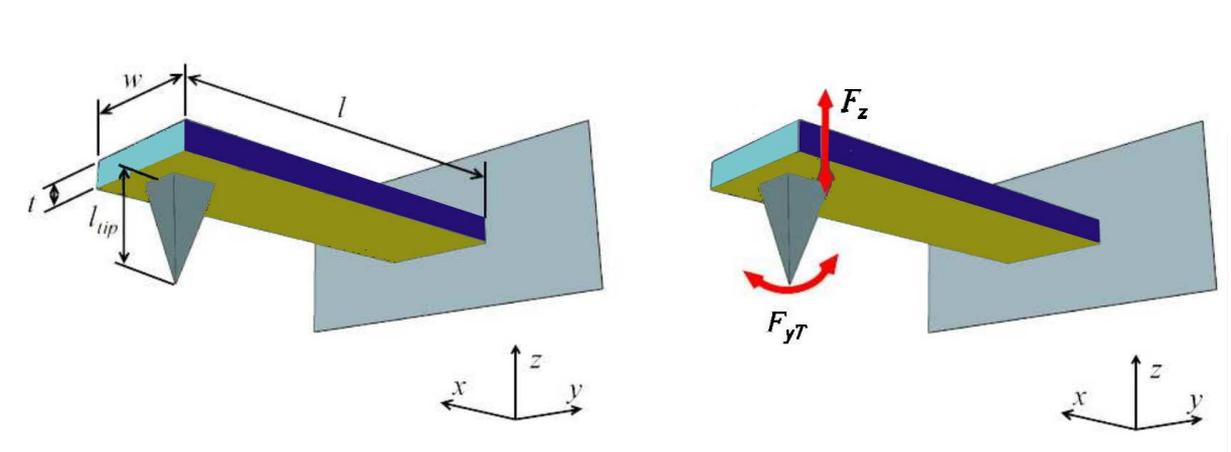


FIGURE 2 – Schéma d'une poutre de microscope à force atomique (Hrouzek 2007)

Un microscope à force atomique possède différents modes de fonctionnement. Dans notre cas, nous considérons le mode statique de contact de la sonde avec la surface à explorer. Dans cette configuration d'utilisation, la sonde est en contact avec la surface qu'elle balaye pour permettre sa reconstitution spatiale tridimensionnelle encore appelée topographie de surface. La mesure de la topographie est réalisée par une mesure de la déflexion et torsion de la poutre. Avec cette technique la résolution est de l'ordre de grandeur de la taille des atomes. Par contre, l'inconvénient est qu'elle laisse sur l'échantillon et sur la sonde les résultats des frictions fortes les endommageant définitivement.

Dans les tableaux 1 et 2 sont regroupés l'ensemble des dimensions usuelles des poutres et des caractéristiques mécaniques des microscopes à force atomique.

Question1 (2 points)

Dessiner la poutre et la sonde sur un ou des schémas et représenter : les axes et les efforts extérieurs à ce système. Écrire les torseurs des efforts de la liaison encastrement en son point d'application O ainsi que le torseur des efforts de la surface sondée au point d'application que l'on notera : A , et que l'on prendra au bout de la pointe de la sonde (tip).

Question2 (2 points)

Appliquer le Principe fondamental de la statique à l'ensemble constitué par la poutre et la sonde. En déduire les expressions des inconnues de liaison de la poutre encastree en O en fonction de F_z et F_y . On posera dans la suite de ce problème : $F_y = F_{yT}$. Les efforts F_z et F_y représentent les forces de la surface étudiée sur l'ensemble : "poutre + sonde". Ils sont considérés comme positif dans la direction des axes les portant.

Question3 (2 points)

Appliquer le principe fondamental de la statique à la poutre sectionnée afin de déterminer les efforts internes : \vec{N} , \vec{T} et \vec{M}_o . Montrer que la relation : $d\vec{M}_o/positivedt = -\vec{T}$ est vérifiée au signe près pour la composante suivant l'axe \vec{k} .

Question4 (2 points)

Dessiner les diagrammes des efforts tranchant et des moments fléchissant suivant les trois axes : \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} .

Question5 (2 points)

Sur les trois moments fléchissant calculés, deux sont des moments de flexion et un est un moment de torsion. Identifier ces moments et donner les relations permettant de déterminer les déformées et l'angle de torsion. On notera les moments quadratiques : I_y , I_z et I_o sans les expliciter. (*N.B. : cette question ne demande aucun calcul*)

Question6 (2 points)

Donner les expressions des flèches f_z et f_y en fonction des composantes des forces, des moments quadratiques, du module d'Young et de la longueur de la poutre l . Il est rappelé que les conditions aux limites pour un encastrement sont une liaison immobile et une tangente horizontale.

Question7 (2 points)

Donner l'expression de l'angle de torsion en bout de poutre (c.a.d. en $x = l$) en fonction de l_t , G , I_o , l et de la composante de la force d'interaction entre la sonde et le support à caractériser provoquant la torsion.

Question8 (2 points)

Mettre les résultats des flèches en fonction des forces sous la forme : $F_y = K_y f_y$ et $F_z = K_z f_z$. Donner l'expression du moment quadratique d'une poutre de section carrée de largeur "b" et de hauteur "h". Pour une poutre en silicium (Cf. Table 2), donner la gamme des coefficients de raideur maximum et minimum en vous servant de la Table 1. Sachant que les forces mises en jeu sont de l'ordre du pico-Newton en déduire les flèches correspondantes.

Question9 (2 points)

En ce qui concerne la torsion de la poutre, le moment quadratique est approximé correctement par : $I_o = \frac{1}{3}(1 - 0.63\frac{h}{b}) \times bh^3$ avec "b" la base de la poutre et "h" sa hauteur. Si l'on considère que le silicium est incompressible, le module de cisaillement G est trois fois plus faible que le module d'Young. Dans ce cas, donner les angles de torsion des poutres dont les dimensions sont données dans la Table 1.

Question10 (2 points)

Retrouver les résultats des expressions des flèches et de l'angle de torsion en bout de poutre en appliquant le théorème de Castigliano (Méthode énergétique).

Propriété mécanique	Minimale	Maximale
Longueur : l (μm)	50	600
Largeur : w (μm)	20	50
Épaisseur : t (μm)	0.5	5
Longueur sonde : l_{tip} (μm)	3	30

TABLE 1 – Dimensions usuelles des poutres d'AFM.

Matériaux	E (GPa)	ρ (kg/m^3)
Si_3N_4	310	3180
Si	130-188	2330
W	350	19310
Ir	530	22650

TABLE 2 – Caractéristiques mécaniques des matériaux souvent utilisés pour les poutres d'AFM.