

Comment mesure-t-on la masse d'un atome avec un NEMS et à quoi cela sert-il ?

Anthony Ayari, du laboratoire de physique de la matière condensée (CNRS/ Université Claude Bernard), Philippe Andreucci, Liviu Nicu

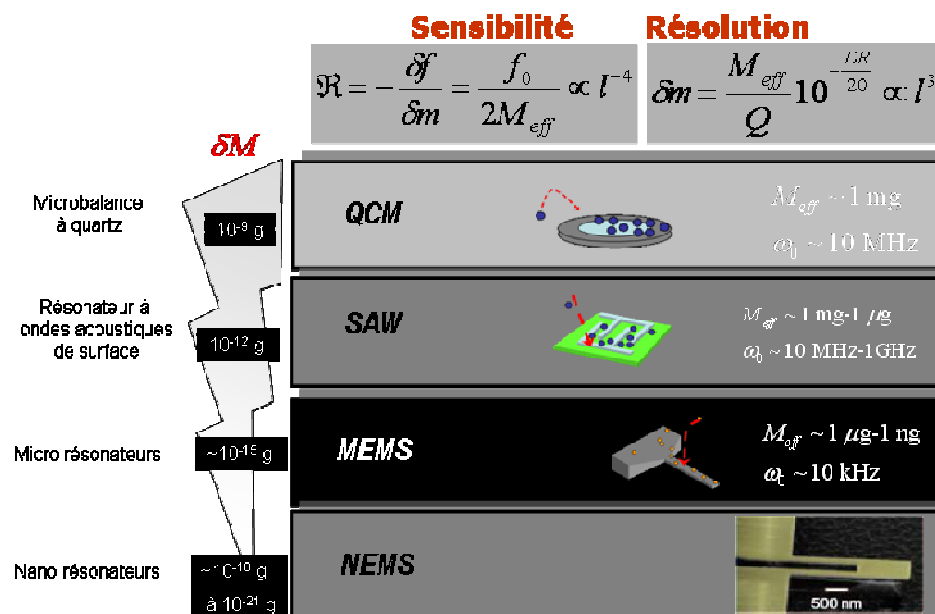
Les airbags de voiture, certains video-projecteurs et la manette de la wii ont en commun d'utiliser des composants alliant électronique et mécanique que l'on nomme des MEMS (microelectromechanical systems pour système microélectromécanique). Compte tenu de la miniaturisation croissante des composants et du succès commercial des MEMS, l'industrie de la microélectronique et les chercheurs s'intéressent assez naturellement aux potentialités de sa version nanométrique : le NEMS (nanoelectromechanical systems pour système nano-électromécanique). La première application envisagée pour les NEMS est de les utiliser en tant que capteur de masse, autrement dit comme nanobalance, car leurs petites tailles les rendent extrêmement sensibles. Mais cette hyper sensibilité est également ce qui rend leur maîtrise difficile. Cela explique que ce n'est que très récemment, après 10 ans d'effort, que la résolution en mesure de masse d'un atome a été atteinte.

Sous sa forme la plus répandue, un NEMS peut être vu comme un transistor nanométrique mobile par rapport à son substrat. Il peut vibrer et émettre un signal à certaines fréquences comme un instrument de musique vibre et émet un son pour certaines notes. Ces fréquences propres du NEMS sont directement reliées à sa masse. On peut comprendre intuitivement cela en imageant à l'échelle humaine : plus vous êtes lourd, moins vous allez vite, donc plus vous mettez de temps à faire des allers-retours. Ainsi votre fréquence de « vibration » diminue. On observe la même chose avec un NEMS. Lorsque l'on dépose des atomes sur sa surface, il s'alourdit, ce qui abaisse sa fréquence de vibration. En calibrant votre NEMS vous pouvez alors déduire la quantité de masse déposée : c'est le principe de la balance à quartz.

Depuis la première utilisation d'un NEMS pour peser des petits objets, jusqu'à aujourd'hui, la résolution massique de ces capteurs a progressé d'un facteur 10 millions et est passée maintenant sous la barre du zeptogramme (i.e. 10^{-21} g). Ces progrès sont essentiellement dus à des groupes américains, notamment à Cornell, Berkeley et Caltech. Il est désormais possible avec un NEMS de mesurer la masse d'un atome d'or, ce qui permet d'envisager la mise au point de spectromètres de masse très intégrés pour peser en temps réel et avec de très gros débits de mesure plusieurs types de protéines et d'agrégats de molécules, jusqu'à la molécule unique (masses de quelques daltons où $1\text{Da} = 1.66\text{ yg}$ avec $1\text{yg} = 1\text{ yoctogramme} = 10^{-24}\text{ g}$). En combinant des technologies NEMS pour la détection et des technologies MEMS pour la réalisation d'injecteurs (chromatographie, concentrateur, etc...), il pourrait être envisageable de « peser » les quelques 10^8 protéines typiques d'une cellule de mammifère en moins de 20 minutes, ce qui ouvre des perspectives nouvelles, pour la protéomique notamment. L'utilisation de NEMS en phase gazeuse et/ou liquide ouvre donc de nouvelles perspectives en matière de détection ultra sensible en temps réel de l'impact, l'efficacité et la toxicité de molécules diverses (médicaments etc...) sur des cellules exposées. Il est tout à fait envisageable de parvenir à utiliser de tels nanosystèmes pour détecter et mesurer la toxicité de nanoparticules. On voit là que le « nano » peut aussi servir à quantifier la dangerosité du « nano » !!

Cependant la mesure résolue à l'échelle de l'atome n'est pas suffisante pour envisager les applications. Les difficultés liées à la détection de la masse d'objets biologiques sont très

variées. Tout d'abord, les NEMS sont confrontés aux mêmes difficultés que la microfluidique et les lab-on-chip, à savoir par exemple l'obtention de molécules permettant une détection spécifique sur une surface nanométrique. Ensuite, les NEMS souffrent de défauts intrinsèques tels que la faible reproductibilité de leur procédé de fabrication ou la faiblesse de leur signal. Enfin, les conditions dans lesquelles les mesures sont effectuées en laboratoire sont très éloignées de celles des milieux biologiques. En particulier, les NEMS sont étudiés sous vide, voire sous ultra-vide, alors que les systèmes biologiques évoluent en milieu liquide. Or, du fait de la viscosité de l'eau, un NEMS ne peut pas vibrer dans cet environnement. Cela nécessite donc d'explorer de nouvelles pistes de détection. On peut noter qu'en France le Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (CNRS, Toulouse) ainsi que le CEA - LETI à Grenoble (qui s'est allié avec le groupe américain de M. Roukes à Caltech, leader sur le plan mondial) participent activement aux recherches dans cette voie. Les stratégies mises en œuvre pour relever ces défis sont en cours de développement. Il y a fort à parier que de tels outils à base de NEMS ne pourront être réalisés sans l'apport des techniques héritées de l'industrie de la microélectronique pour les produire en grand nombre de façon répétable et maîtrisée.



Evolution de la résolution de balances électro-mécaniques du macro au nano (QCM : quartz crystal microbalance pour microbalance à quartz, SAW : surface acoustic wave pour onde acoustique de surface)