

## **ED SMAER**

### **Sujet de thèses 2014**

Laboratoire : **Institut des NanoSciences de Paris**

Adresse: **4 place Jussieu, tour 22-32**

Etablissement de rattachement : **Université Pierre et Marie Curie**

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : **BELLIARD Laurent, Section 28**

Codirection et section CNU ou CNRS :

Titre de la thèse : **Confinement thermique et élastique au sein de nanostructures :  
Le nanofil isolé, un système modèle.**

Collaborations dans le cadre de la thèse :

**IM2NP de Marseille, et GSI Helmholtz Center**

#### **Résumé du sujet :**

La réponse vibrationnelle, ainsi que le comportement thermique au sein d'entités de petites dimensions ( $<1\mu\text{m}$ ) sont des sujets d'actualité, tant pour des raisons fondamentales que pour des considérations plus appliquées.

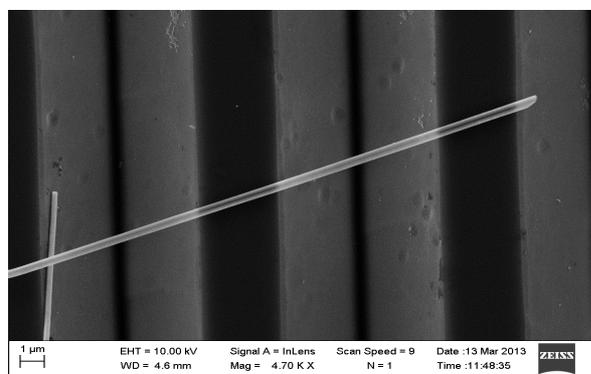
Au cours de ce travail de thèse, nous mettrons en œuvre des approches optiques de type pompe-sonde, soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel, afin d'appréhender comment le confinement au sein d'un unique nanofil perturbe les propriétés de propagation des phonons cohérents (véritables onde élastique), mais également la diffusion des phonons incohérents (pseudo onde thermique). L'effet de paramètres intrinsèques telles que la taille et la forme sera abordé, ainsi que les conditions d'excitation.

Le couplage entre le nano système et son substrat sera un autre paramètre que nous tenterons de contrôler pour obtenir des nanofils isolés, géométrie permettant d'exalter le confinement, donc de modifier le temps de vie de la réponse vibrationnelle.

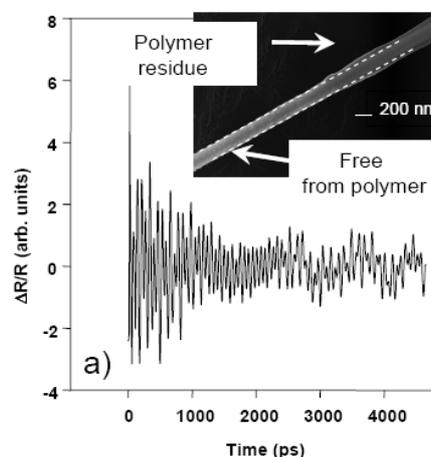
## Sujet développé

### Projet scientifique :

D'un point de vue général, l'élasticité ou la conductivité thermique de nano-objets, thématiques de cette thèse, suscite un vif intérêt dans la communauté scientifique. En effet, bon nombre de questions restent en suspens comme par exemple, la limite de validité en taille de l'hypothèse du milieu continu, le rôle des champs de contraintes internes, l'effet de la structuration sur la réduction du libre parcours moyen des phonons et leur effet sur la conductivité thermique..... L'étude de systèmes modèles, obtenus par des approches de nano-structuration de surface (lithographie électronique...) revêt aussi bien des aspects fondamentaux que des considérations plus appliquées notamment dans le domaine des MEM's, où la réponse vibrationnelle et le transport de la chaleur sont autant de points cruciaux qui affectent le comportement de ces systèmes.



**Figure 1** : Nanofils de cuivre dispersé sur un substrat microstructuré.



**Figure 2** : Signature vibrationnelle d'un nanofil de cuivre de 200nm de diamètre.

En ce qui concerne la réponse élastique, une homothétie de la taille des systèmes s'accompagne d'une augmentation des fréquences de résonances acoustiques ( $> 10$  GHz) ce qui nécessite la mise en œuvre de méthodes astucieuses telles que les méthodes optiques de type pompe-sonde. Ces approches, assistées par des lasers femto-seconde permettent des résolutions temporelles inférieures à la picoseconde, et donc l'extraction du paysage vibrationnel de petites entités. D'autre part, les outils de microscopie développés dans notre équipe, permettent d'ores et déjà l'étude élastique d'objets individuels. Ainsi l'étude portera sur des nanofils réalisés par électrodéposition dans les pores d'une membrane. Au travers d'une collaboration avec l'IM2NP de Marseille, et avec le GSI Helmholtz Center Allemand, nous disposons d'une source d'échantillons de nature très variée. L'effet de paramètres intrinsèques telles que les dimensions, la cristallographie, sera donc étudié. De plus, des géométries exotiques, tubulaire, nanoconique, coeur-coquille, pourront également être abordées avec comme objectif l'exaltation du confinement. En parallèle, les conditions d'excitation pourront être étudiées en fonction de la longueur d'onde et/ou de la polarisation. Afin de s'abstraire de possibles couplages avec l'environnement, nous envisageons d'étudier la réponse vibrationnelle de nanofils métalliques et ceci dans une géométrie auto suspendue, en préparant au préalable les substrats de silicium à l'aide de techniques de gravure anisotrope développées au sein de la salle blanche de l'INSP. Une fois la réponse vibrationnelle caractérisée et modélisée, au travers des différents modes propres du système, le confinement

unidimensionnel de ces structures sera mis à profit pour l'étude de la propagation guidée le long de l'axe de croissance. Cette étude devrait mettre en évidence l'apparition de courbure de bande caractéristique du confinement acoustique. La mise en évidence de cette propagation guidée devrait permettre de développer un nouveau genre de microscopie acoustique avec des résolutions spatiales encore jamais atteintes (~50nm). Parallèlement, ces oscillateurs nanométriques peuvent être considérés comme de nouvelles sources acoustiques. Dans ce cas, le couplage avec le substrat sera au contraire favorisé afin d'étudier la nature des ondes engendrées dans le substrat, un des objectifs étant la création de sources acoustiques pilotables en fréquence mais également en polarisation.

L'approche basée sur les phonons cohérents que nous venons d'esquisser se complétera naturellement par l'étude de l'impact du confinement sur la diffusion des phonons incohérents. Ces aspects thermiques seront abordés à l'aide d'expérience pompe sonde résolue en fréquence, alors que les phénomènes cohérents seront extraits d'expérience pompe sonde résolue en temps. A l'instar des propriétés élastiques, la diffusion de la chaleur au sein d'entités de dimension réduites fait apparaître des phénomènes subtiles et encore beaucoup étudiés comme par exemple la diminution de la conductivité liée à la réduction de la population des phonons balistiques.

### **Techniques utilisées :**

La préparation des systèmes (nanofils, membranes, poutres...) qui seront étudiés fait intervenir des aspects de micro et nano-structuration. Au delà de l'obtention des systèmes nanométriques, un réel challenge sera la maîtrise du couplage entre le système à étudier et son environnement proche. En effet, le couplage avec le substrat sur lequel repose la nanostructure pose de nombreux problèmes, citons par exemple le transfert d'énergie acoustique, phénomène qui limite le temps de vie de la dynamique vibrationnelle du réseau, ou la présence de résistance thermique d'interface qui affecte profondément la diffusion des phonons incohérents. En nano-structurant les substrats à l'aide des techniques conventionnelles que l'on peut trouver en salle blanche (lithographie, gravure isotrope et anisotrope, utilisation de couche sacrificielle...), nous serons à même de résoudre certaines de ces difficultés.

Les mesures thermiques seront réalisées à l'aide d'un microscope à thermoréflectance. Deux faisceaux pompe et sonde transitent dans un microscope permettant d'une part la création d'une source de chaleur présentant un diamètre inférieur au micromètre et d'autre part la mesure du champ de température à la surface de l'échantillon à l'aide de la variation du coefficient de réflexion. Le faisceau pompe étant modulé en intensité (100Hz – 2 MHz), une détection synchrone traite le signal issu de la photodiode. Les cartographies sont réalisées avec une résolution spatiale inférieure au micron sur des objets macroscopiques. Dans le cas d'objets de taille inférieure, ce sont les objets qui fixent la résolution. Afin de prendre en main cette technique expérimentale, nous proposerons une étude préliminaire novatrice sur l'effet d'une transition de phase structurale sur la diffusivité thermique au sein d'alliages à base de nitrure, présentant de nombreux avantages en terme de tribologie.

L'ensemble des mesures acoustiques sera réalisé à l'aide d'une technique optique habituellement appelée l'acoustique picoseconde, dont l'équipe a été pionnière en France. L'idée de base, calquée sur le principe de l'écholocation du règne animal, est de générer à l'aide d'une impulsion laser ultra brève (<100fs) une déformation locale qui engendre une onde acoustique pouvant se propager dans le système à étudier. La détection de cette onde élastique se fait à l'aide d'une autre impulsion décalée en temps de quelques picosecondes. L'équipe dispose actuellement de trois bancs expérimentaux permettant des mesures

synchrones, asynchrones, basses températures, interférométriques et des mesures résolues spatialement.

L'un de ces bancs sera complètement dédié aux travaux expérimentaux de cette thèse. Afin de prendre en main cette technique expérimentale, nous proposerons une étude sur le phénomène de Phonon-Focussing au sein d'une membrane de silicium, étude qui sera ensuite réinvestit dans l'analyse du confinement par un système nanoconique.

### **Modélisation :**

Les modèles macroscopiques seront traités analytiquement dans la mesure du possible. Sinon, des simulations numériques seront effectuées à l'aide de logiciels : Matlab, Comsol...

### **Références (pour en savoir plus) :**

*Vibrational response of free standing single copper nanowire through transient reflectivity microscopy*

L. Belliard, TW. Cornelius, B. Perrin, N. Kacemi, ... Jour. Appl. Phys (114), 193509 (2013)

*Lateral heat diffusion investigation of a layered structure: Application to the complete thermal characterization of a lithium phosphorous oxynitride film*

F. Xu, J.-Y. Duquesne, L. Belliard, S. Martin, C. Secouard, C. Fréty, S. Vincent, D. Fournier, B. Perrin, Jour. Appl. Phys (113), 244304 (2013)

*Towards a generation of tunable transverse waves*

A. Amziane, L. Belliard, F. Decremps, B. Perrin, Phys. Rev B (83), 014102 (2011)

*Three-dimensional acoustic wavefront imaging in anisotropic systems by picosecond acoustics*

S. Zhang, E. Peronne, L. Belliard, Jour. Appl. Phys (109), 033507 (2011)

*Elastic properties and phonon generation in Mo/Si superlattices*

L. Belliard, A. Huynh, B. Perrin....Phys. Rev. B (80), 155424 (2009)

**Qualités du candidat requises : étudiant curieux**

**Si oui, mode de financement envisagé : Ecole doctorale.....**