

Offre de thèse de doctorat / PhD thesis offer (english version below)

## Spectroscopie infrarouge thermique en champ proche par microscopie à force atomique

### Description du sujet de thèse

La spectroscopie infrarouge est une technique de caractérisation très développée et utile dans de nombreux domaines. Elle est une méthode classique pour déterminer la composition locale d'un échantillon : les liaisons atomiques produisent en effet souvent une signature caractéristique dans la gamme spectrale infrarouge et la comparaison d'un spectre avec une bibliothèque de réponses spectrales permet d'identifier l'échantillon. Indépendamment, le flux radiatif émis par une surface opaque dépend de sa température en vertu de la loi de Planck, et capter ce flux permet donc de déterminer directement la température du corps. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (d'acronyme anglais FTIR) permet d'obtenir des spectres dans la zone du moyen infrarouge dans ce but mais, comme toute méthode optique, elle souffre d'une résolution spatiale limitée. Il est donc difficile d'obtenir des spectres sur des zones de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$  (longueur d'onde de Wien). De plus, un spectromètre FTIR est généralement un objet volumineux, qui n'est pas nécessairement transportable. Le développement d'une technique qui pourrait allier meilleur résolution spatiale et absence de spectroscope FTIR classique serait donc bienvenu.

La microscopie en champ proche, qui est dérivée de la microscopie à force atomique (d'acronyme anglais AFM), consiste à approcher une pointe effilée près d'une surface afin d'obtenir des informations sur celle-ci. La microscopie thermique à sonde locale (*scanning thermal microscopy*, SThM) consiste à mesurer le flux échangé par la pointe avec l'échantillon à l'aide d'un capteur thermique situé sur la pointe [1]. Lorsque la pointe n'est pas encore en contact avec l'échantillon, elle échange par rayonnement thermique avec celui-ci. Lorsque la distance entre la pointe et l'échantillon est inférieure à 10  $\mu\text{m}$ , c'est-à-dire la longueur caractéristique du rayonnement thermique dans la vide (longueur d'onde Wien), l'échange a lieu par « effet tunnel de photon », également appelé rayonnement thermique en champ proche. Il a été démontré de nombreuses fois que le flux échangé est alors bien plus grand que celui qui est prédit par la loi de Planck (qui ne s'applique qu'en champ lointain en fait) [2], et celui-ci est localisé près de la pointe : la résolution spatiale peut être bien inférieure au micro, super-résolue. Le principal problème est que cette technique n'apporte *a priori* pas d'information spectrale, contrairement aux techniques basées sur la spectroscopie FTIR [3].

Afin de remédier à ce point, nous proposons d'étudier systématiquement les courbes d'approche flux =  $f$ (distance) en fonction de la température de sonde [4]. La température  $T$  et la fréquence  $\nu$  sont couplées via le paramètre sans dimension qui intervient dans la distribution de Bose-Einstein  $\frac{\hbar\nu}{k_B T}$ . Modifier la température revient donc à considérer le flux dans une fenêtre spectrale différente. Une méthode inverse doit donc permettre de remonter aux informations spectrales. De plus, l'analyse en fonction de la distance doit permettre de déterminer également l'effet du vecteur d'onde (inverse de la distance) sur la puissance radiative échangée. Au final, ces études systématiques doivent permettre de tracer un diagramme flux =  $f$ (fréquence, vecteur d'onde) caractéristique de la surface du matériau considéré et également de sa structuration. Ceci devrait permettre le développement d'une méthode d'analyse infrarouge en champ proche sans spectroscope FTIR.

Financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via le projet STORE, le travail de thèse consistera à développer cette technique prometteuse d'un point de vue expérimental au Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL) dans l'équipe de recherche du Thème « Micro

et NanoThermique » (MiNT). Afin de tester l'instrument, des échantillons qui permettront de démontrer la puissance de cette nouvelle technique seront conçus avec l'aide de la plateforme de nanofabrication NanoLyon (Institut des Nanotechnologies de Lyon, INL) et ils seront parallèlement étudiés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon, CETHIL : Thème Milieux Réactif et Transferts Radiatifs, MRTR).

Ce travail se fera en collaboration proche avec les autres membres de l'équipe MiNT travaillant sur la partie expérimentale afin de guider les choix de conception et fabrication ; le doctorant pourra aussi être impliqué dans les projets européens [TPX-Power](#) et [OPTAGON](#) dédiés à la conversion d'énergie [5].

[1] [Scanning Thermal Microscopy: a review](#), S. Gomes, A. Assy, P.-O. Chapuis, Physica Status Solidi (a), 212, 477-494 (2015)

[2] [Radiative heat transfer at nanoscale: experimental trends and challenges](#), C. Lucchesi, R. Vaillon, P.-O. Chapuis, Nanoscale Horizons 6, 201 (2021)

[3] [Blackbody radiation revisited in the near-field](#), A. Babuty, K. Joulain, P.-O. Chapuis, J.-J. Greffet, Y. de Wilde, Physical Review Letters 110, 146103 (2013)

[4] [Temperature dependence of near-field radiative heat transfer above room temperature](#), C. Lucchesi, R. Vaillon, P.-O. Chapuis, Materials Today Physics 21, 100562 (2021)

[5] Communiqué de presse CNRS, juin 2021 : [Convertir un rayonnement thermique en électricité : un cap franchi](#)

## **Contexte de travail**

La thèse sera réalisée dans les équipes "Micro et NanoThermique" (MiNT) et « Milieux réactifs et Transferts Radiatifs » (MRTR) au Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon (CETHIL), sur le campus La Doua-LyonTech à Villeurbanne. L'équipe MiNT, composée d'une quinzaine de personnes dont 5 chercheurs et enseignants-chercheurs, est spécialiste de rayonnement thermique dans les nanostructures, tandis que l'équipe MRTR est spécialiste de rayonnement thermique dans les milieux opaques et semi-transparents. Les efforts de nanofabrication seront effectués dans le cadre de la Plateforme de nanofabrication NanoLyon située à l'Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), et la conception des échantillons aura lieu en collaboration avec l'équipe "Ingénierie et conversion de la lumière" de l'INL.

## **Informations complémentaires**

La thèse sera réalisée dans le cadre du projet ANR STORE dédié au développement de cette technique. Le consortium implique des chercheurs du CETHIL et de l'INL, laboratoires situés tous deux sur la campus La Doua LyonTech. Le projet commence au printemps 2022. Une partie du travail sera également effectuée dans le cadre des projets européens TPX-Power et OPTAGON, qui impliquent aussi la maîtrise des déplacements nanométriques pour des applications énergétiques.

**Lieu de travail** : Campus La Doua LyonTech

**Nom du responsable scientifique** : P-Olivier CHAPUIS ([olivier.chapuis@insa-lyon.fr](mailto:olivier.chapuis@insa-lyon.fr), [web](#))

Autres contacts : Olivier MERCHERS ([olivier.merchers@insa-lyon.fr](mailto:olivier.merchers@insa-lyon.fr), [web](#)), Agnès DELMAS ([agnes.delmas@insa-lyon.fr](mailto:agnes.delmas@insa-lyon.fr), [web](#))

:

**Type de contrat** : CDD Doctorant/Contrat doctoral (36 mois) INSA

**Date de début de la thèse** : Printemps-été 2022 (1er septembre 2022 au plus tard), en fonction de la disponibilité du candidat sélectionné.

*Merci de postuler avec un CV détaillé, une lettre de motivation, le dossier académique des 3 dernières années (notes) et d'indiquer les noms de trois références (encadrants de stage ou responsables de parcours).*

---

**PhD thesis offer** (french version above)

## **Near-field thermal infrared spectroscopy using atomic force microscopy**

### **Description of PhD thesis topic**

Infrared spectroscopy is a highly-developed characterization technique useful in many fields. It is a classic method for determining the local composition of a sample: atomic bonds often produce a characteristic signature in the infrared spectral range and the comparison of a spectrum with a library of spectral responses makes it possible to identify the sample. Independently, the radiative flux emitted by an opaque surface depends on its temperature by virtue of Planck's law, and capturing this flux therefore allows to directly determine the temperature of the body. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) makes it possible to obtain spectra in the mid-infrared region for this purpose but, like any optical method, it suffers from limited spatial resolution. It is therefore difficult to obtain spectra on areas with a diameter smaller than 10  $\mu\text{m}$  (Wien's wavelength). Moreover, a FTIR spectrometer is generally a bulky object, which is not easily transportable. The development of a technique that could combine better spatial resolution and the absence of a conventional FTIR spectroscope would therefore be welcome.

Near-field microscopy, which is derived from atomic force microscopy (AFM), consists of approaching an elongated tip close to a surface in order to obtain information about it. Scanning thermal microscopy (SThM), one of the near-field techniques, consists of measuring the flux exchanged by the tip with the sample using a thermal sensor located on the tip [1]. When the tip is still out of contact with the sample, it exchanges thermal radiation with it. When the distance between the tip and the sample is less than 10  $\mu\text{m}$ , i.e. the characteristic length of thermal radiation in vacuum (Wien's wavelength), the exchange takes place by "photon tunneling", also called near-field thermal radiation. It has been demonstrated many times that the flux exchanged is then much greater than that which is predicted by Planck's law (which only applies in the far field) [2], and the exchange is localized just under the tip: spatial resolution can be much lower than one micrometre, i.e. it is super-resolved. The main problem is that this technique does not provide spectral information, unlike techniques based on FTIR spectroscopy [3].

In order to circumvent this issue, we propose to systematically study the flux =  $f$  (distance) approach curves as a function of the probe temperature [4]. The temperature  $T$  and the frequency  $\nu$  are coupled via the dimensionless parameter which intervenes in the Bose-Einstein distribution  $\hbar\nu/(k_B T)$ . Modifying the temperature is similar to considering the flux in a different spectral window. An inverse method must therefore enable to obtain to the expected spectral information. In addition, the analysis according to the distance must also allow to determine the effect of the wave vector (inverse of the distance) on the radiative power exchanged. In the end, these systematic studies should make it possible to draw a contour plot flux =  $f$  (frequency, wave vector) characteristic of the surface of the material considered and also of its structure. This should allow the development of a near-field infrared analysis method without a FTIR spectroscope.

Funded by the National Research Agency (ANR) through the STORE project, the PhD thesis work will consist in developing this promising technique from an experimental point of view at the

Centre for energy and Thermal Sciences of Lyon (CETHIL) in the research team "Micro and Nanoscale Heat Transfer" (MiNT). In order to test the instrument, samples that will demonstrate this novel powerful technique will be designed with the help of the NanoLyon nanofabrication platform (Institut des Nanotechnologies de Lyon, INL) and they will be studied in parallel by Fourier transform infrared spectroscopy within the Theme "Reactive Media and Radiative Transfer", MRTR at CETHIL. This work will be performed in close collaboration with the other members of the MiNT team working on the experimental part in order to guide the design and manufacturing choices; the doctoral student may also be involved in the European [TPX-Power](#) and [OPTAGON](#) projects dedicated to energy conversion [5].

[1] [Scanning Thermal Microscopy: a review](#), S. Gomes, A. Assy, P.-O. Chapuis, *Physica Status Solidi (a)*, 212, 477-494 (2015)

[2] [Radiative heat transfer at nanoscale: experimental trends and challenges](#), C. Lucchesi, R. Vaillon, P.-O. Chapuis, *Nanoscale Horizons* 6, 201 (2021)

[3] [Blackbody radiation revisited in the near-field](#), A. Babuty, K. Joulain, P.-O. Chapuis, J.-J. Greffet, Y. de Wilde, *Physical Review Letters* 110, 146103 (2013)

[4] [Temperature dependence of near-field radiative heat transfer above room temperature](#), C. Lucchesi, R. Vaillon, P.-O. Chapuis, *Materials Today Physics* 21, 100562 (2021)

[5] CNRS press release, june 2021: [Convertir un rayonnement thermique en électricité : un cap franchi](#). EN version on the CETHIL website: [Converting thermal radiation into electricity : a milestone is reached](#).

### **Work context**

The PhD thesis will be carried out in the "Micro and Nanoscale Heat Transfer" (MiNT) and "Reactive Media and Radiative Transfer" (MRTR) teams at the Centre for Energy and Thermal Science of Lyon (CETHIL), on the La Doua-LyonTech campus in Villeurbanne. The MiNT team, made up of about fifteen people including 5 permanent researchers and faculties, specializes in thermal radiation in nanostructures, while the MRTR team specializes in thermal radiation in opaque and semi-transparent media. The nanofabrication efforts will be carried out within the framework of the NanoLyon Nanofabrication Platform located at the Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), and the design of the samples will take place in collaboration with the "Engineering and light conversion" team of the INL.

### **Further information**

The PhD thesis will be carried out within the framework of the STORE project funded by the French National Research Agency (ANR), which is dedicated to the development of this technique. The consortium involves researchers from CETHIL and INL, laboratories both located on the La Doua LyonTech campus. The project starts in Spring 2022. Part of the work will also be carried out within the framework of the European projects TPX-Power and OPTAGON, which also involve the control of nanometric displacements, for energy applications.

**Location:** National Institute for Applied Sciences (INSA), Campus La Doua LyonTech, Lyon (France)

**Supervisor:** P-Olivier CHAPUIS ([olivier.chapuis@insa-lyon.fr](mailto:olivier.chapuis@insa-lyon.fr), [web](#))

Other contact persons: Olivier MERCHIEIS ([olivier.merchiers@insa-lyon.fr](mailto:olivier.merchiers@insa-lyon.fr), [web](#)), Agnès DELMAS ([agnes.delmas@insa-lyon.fr](mailto:agnes.delmas@insa-lyon.fr), [web](#))

:

**Type of contract:** Fixed-term (CDD) PhD student contract (3 years) at INSA

**Starting date of the PhD thesis:** Spring or Summer 2022 (September 1, 2022, at the latest), with some flexibility depending on the selected candidate's availability.



*Applications should include a detailed resume, a letter of motivation, the academic file (grades) of the 3 last years, and please provide also the names of three references (previous advisor, head of studies, ...).*