# Ed SMAER – 391
# Sujet de thèse 2013

***Nouvelle génération de détecteurs ultra-rapides pour le rayonnement synchrotron en ondes térahertz***

**Laboratoire :** UMR CNRS 8507 ; Laboratoire de génie électrique de Paris (LGEP), Supélec
Équipe : Matériaux et dispositifs : des micro-ondes à l'infrarouge (MDMI) ; http://mdmi.lgep.supelec.fr
**Etablissement de rattachement :** UPMC Univ Paris 06
**Directeur de thèse** : Alain Kreisler, Pr Em UPMC Univ Paris 06, CNU 63 (Alain.Kreisler@supelec.fr)
**Co-directions** : Laurent Manceron, DR CNRS – UMR 7075 UPMC (manceron@synchrotron-soleil.fr)
Annick Dégardin, Pr UPMC Univ Paris 06, CNU 63 (Annick.Degardin@supelec.fr)

**Titre de la thèse** : Nouvelle génération de détecteurs ultra-rapides pour le rayonnement synchrotron en ondes térahertz

**Collaborations dans le cadre de la thèse** : Synchrotron SOLEIL + liaison projet ANR MASTHER

## Description du projet

***Contexte de l'étude.*** Les ondes électromagnétiques THz dont la gamme de fréquences s'étend typiquement de 300 GHz à 10000 GHz (= 10 THz) offrent actuellement de nombreux champs d'applications pratiques (biomédical, contrôle industriel, sécurité civile, etc.). Mais elles offrent aussi un grand intérêt dans diverses branches de la recherche fondamentale (astrophysique, physique, chimie), en raison des nombreuses entités (atomes, ions, radicaux, molécules) qui présentent des fréquences caractéristiques dans ces gammes. C'est ainsi que ces dernières années, avec l'avènement de sources de rayonnement électromagnétique de hautes performances (rayonnement synchrotron), on a vu un nouvel essor dans le domaine de la spectroscopie THz à haute résolution et en régime d'impulsions, qui a créé un besoin en détecteurs THz ultrarapides : la présente thèse offre une solution novatrice dans ce champ.

Dans le présent contexte, les nano-détecteurs bolométriques dits "à électrons chauds" (*Hot Electron Bolometer* – HEB), à base de supraconducteurs, sont une solution attrayante pour la détection des ondes THz. Le principe du HEB repose sur le transfert à l'échelle microscopique du principe d'un bolomètre conventionnel, c'est-à-dire un détecteur sensible à la puissance (figure 1). L'utilisation de l'oxyde supraconducteur à haute température critique YBaCuO ($T_c$ = 92 K) présente en outre la caractéristique unique de posséder un temps de réponse intrinsèque $\tau_{e\text{-}ph}$ voisin de la picoseconde.

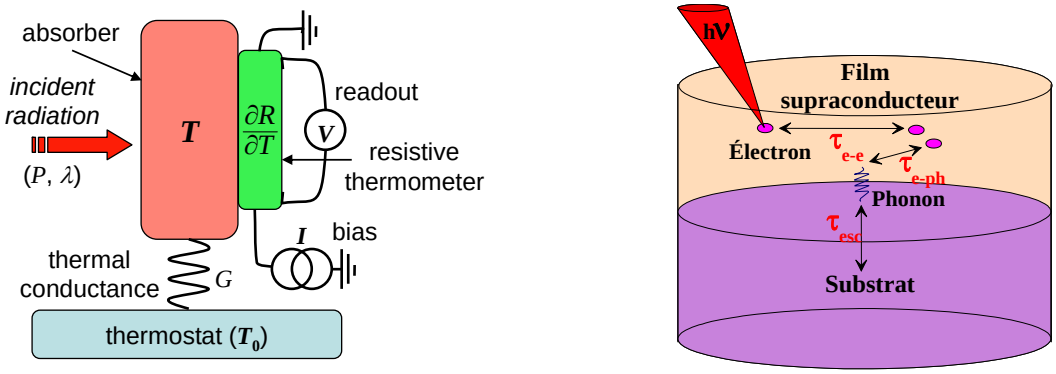


**Figure 1.** À gauche : principe d'un bolomètre conventionnel (détecteur thermique). À droite : principe du bolomètre à électrons chauds (HEB) supraconducteur (les électrons jouent le rôle d'absorbant, le réseau cristallin – phonons – joue le rôle de thermostat et la conductance thermique est assurée par l'interaction électron-phonon).

***Aspect novateur et objectifs généraux.*** Les HEB supraconducteurs ont fait leurs preuves en tant que mélangeurs de fréquences (en mode continu) pour la détection hétérodyne en ondes THz. C'est ainsi que des HEB à supraconducteurs basse-Tc (NbN) équipent l'instrument HIFI de la sonde spatiale Herschel lancée en mai 2009. Pour sa part, le LGEP a largement innové dans le domaine des HEB supraconducteurs haute-Tc [1-4]. Les développements les plus récents des travaux du LGEP ont eu lieu dans le cadre d'une action Marie Curie (EU, 2006-2009, projet NANOTIME – *NANostructures of Oxides for Terahertz IMaging Exploration*) et se poursuivent avec le projet ANR MASTHER – *Miniturized All-Solid state Terahertz HEterodyne Receiver* (2011-2015).

Le potentiel des HEB supraconducteurs haute-Tc se situe dans leur temps de réponse extrêmement rapide. En effet, ce temps de réponse est directement lié au temps d'interaction électron-phonon qui pour YBaCuO (Tc voisin de 90 K) se situe au voisinage de la picoseconde, soit deux à trois ordres de grandeur plus court que NbN ou Nb, respectivement. Il est donc légitime d'envisager avec YBaCuO des détecteurs bolométriques ultra-rapides et à faible bruit, en particulier dans le domaine THz, région spectrale où le rayonnement peut être couplé au bolomètre à l'aide d'une antenne planaire intégrée (figure 2). L'expérience proposée ici s'appuiera sur des résultats antérieurs concernant la réponse large bande [5] (figure 3) et rapide [6] (figure 4) de films minces d'YBaCuO. Elle consistera à explorer la réponse de micro- ou nano-bolomètres en YBaCuO avec le rayonnement synchrotron SOLEIL (ligne AILES). La réponse rapide du HEB permettra de travailler en mode d'impulsions et de mesurer la sensibilité en fonction de la fréquence et de la température (au voisinage de la transition supraconductrice). De manière plus générale, on examinera et optimisera le couplage du rayonnement synchrotron à l'antenne THz (directivité, sensibilité à la polarisation).

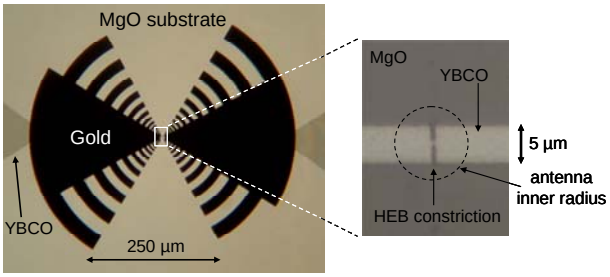


**Figure 2.** Micro-antenne planaire large bande (0,3 – 10 THz) couplée à un HEB en YBaCuO (constriction) [2,3].

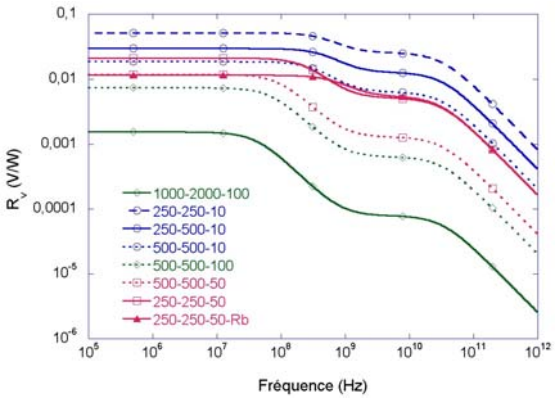


**Figure 3.** Réponses fréquentielles théoriques de micro- et nano-constrictions en YBaCuO [5].

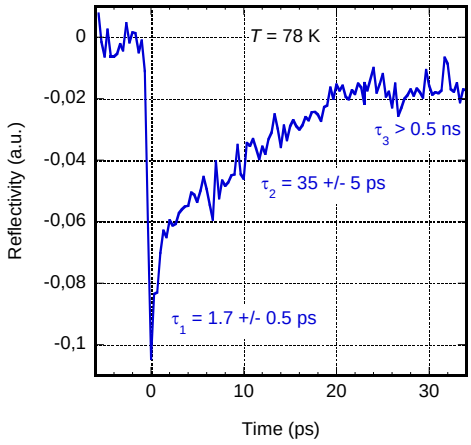


**Figure 4.** Expérience de spectroscopie pompe-sonde femtoseconde à 800 nm, résolue en temps, mettant en évidence les temps caractéristiques de réponse d'un film mince d'YBaCuO supraconducteur [6]. Le temps $\tau_1$ correspond à l'interaction électron-phonon et traduit la réponse ultra-rapide exploitable dans le détecteur dont l'étude fait l'objet de la thèse.

***Objectifs scientifiques de la thèse.*** La thèse, à composante expérimentale forte, consiste à développer un démonstrateur complet de détecteur THz ultra-rapide. Il sera réalisé à partir d'un nanobolomètre HEB à base de couches ultra-minces (10 - 40 nm) d'YBaCuO. La nanostructuration de ces couches constitue un défi en raison de la facile désoxygénation du matériau YBaCuO lors du processus technologique qui combinera des étapes de lithographies électronique et optique. Le HEB sera couplé au rayonnement THz à l'aide d'une micro-antenne. Les points à aborder au cours de la thèse seront les suivants :

**a)** Évaluation des performances potentielles : modélisation des phénomènes physiques apparaissant dans les dispositifs HEB (modélisations microscopiques spécifiques aux supraconducteurs à haute $T_c$, modélisations des bilans thermiques entre le capteur et son environnement, modélisations électro-magnétiques des circuits de lecture ultra-rapide). Des mesures FTIR dans la gamme des fréquences THz permettront de compléter les connaissances sur les propriétés optiques des couches ultra-minces d'YBaCuO en infrarouge lointain.

**b)** Conception des composants : conception et réalisation en salles blanches de nano-constrictions élaborées sur les films ultra-minces supraconducteurs d'YBaCuO et couplées à des micro-antennes planaires large bande ; des tests électriques et optiques effectués sur les dispositifs HEB permettront d'évaluer les effets du vieillissement des films ultra-minces d'YBaCuO et d'optimiser les étapes du processus technologique de fabrication.

**c)** Mise en œuvre du détecteur : dans cette étape finale, un système détecteur THz sera conçu et mis en place. Des tests intensifs de validation seront menés sur le site du synchrotron SOLEIL (ligne AILES), suivant divers modes de trains d'impulsions THz délivrés par l'instrument. La validation sur des expériences de spectroscopie sera effectuée avec les scientifiques de SOLEIL [7,8].

***Niveaux de connaissances et compétences requises***

Diplôme de Master en Sciences et Technologies ou diplôme d'ingénieur : électronique ou photonique ou physique appliquée.

Affinité à combiner des connaissances en physique de base avec l'ingénierie instrumentale.

***Bibliographie***


1. Ch. Péroz, A.F. Dégardin, J. C. Villégier, and A.J. Kreisler, "Fabrication and Characterization of Ultrathin PBCO/YBCO/PBCO Constrictions for Hot Electron Bolometer THz Mixing Applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17-2**(2), pp. 637-640 (2007).
2. M. Aurino, A.J. Kreisler, I. Türer, A. Martinez, A. Gensbittel, and A.F. Dégardin, "YBCO hot-electron bolometers dedicated to THz detection and imaging: embedding issues," *Journal of Physics: Conference Series* **234** (2010) 042002.
3. I. Türer, X. Gaztelu, N. Ribière-Tharaud, A.F. Dégardin, and A.J. Kreisler, "Modeling of broadband antennas for hot electron bolometers at terahertz frequencies," *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics* ***9***, F. Sabath *et al*. Eds, Springer, pp. 179-188 (2010).
4. R.G. Ladret, A.F. Dégardin, and A.J. Kreisler, "Nano-patterning and hot spot modeling of YBCO ultrathin film constrictions for THz mixers," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (3), p. 23003305 (2013).
5. A. Adam, A. Gaugue, C. Ulysse, A. Kreisler, and C. Boulanger, "Three-temperature model for hot electron superconducting bolometers based on high-Tc superconductor for terahertz applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13**(2), 155-159 (2003).
6. V. Garcés-Chávez, A. De Luca, A. Gaugue, P. Georges, A. Kreisler, A. Brun, "Temporal response of high-temperature superconductor thin-film using femtosecond pulses," *Appl. Supercond., Inst. Phys. Conf. Ser.* No **167**, 93-96 (2000).
7. V. Boudon, O. Pirali, P. Roy, J.B. Brubach, L. Manceron, J. Vander Auwera, "The high-resolution far-infrared spectrum of methane at the SOLEIL synchrotron," *J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans.* **111**, 1117-1129 (2010).
8. J.B. Brubach, L. Manceron, M. Rouzières, O. Pirali, D. Balcon, F. Kwabia Tchana, V. Boudon, M. Tudorie, T. Huet, A. Cuisset, and P. Roy, "Performance of the AILES THz-Infrared beamline at SOLEIL for high resolution spectroscopy," *AIP Conf. Proc.* **1214**, 81-84 (2010).