

Recherche sur crédits incitatifs - Appel 2007

Proposition déposée par les groupes
Télécommunications Optiques et Radio-Fréquences et Micro-ondes de Télécom Paris

PASTEL : **Photodétecteur et Antenne pour Source TeraHertz en Espace Libre**

Contexte scientifique et stratégique:

Une nouvelle gamme de sources rayonnantes, dites sources TeraHertz (THz), suscite depuis quelques années une forte attention de la part de la communauté scientifique. Encore à un stade de recherche, elles offrent des perspectives réelles pour le développement des technologies de l'information et de la communication, car elles permettent d'accéder à une plage du spectre électromagnétique restée jusqu'à présent largement inexploitée. Certaines applications sont ainsi susceptibles de voir leur domaine d'emploi élargi vers les hautes fréquences, par exemple dans les radiocommunications, d'autres d'apporter des innovations majeures si elles s'appuient sur des propriétés spécifiques au rayonnement THz:

- dans le domaine de l'*imagerie*, les sources THz pourront offrir une alternative intéressante aux sources de rayonnement X grâce à leur faible nocivité et à la transparence de nombreux matériaux organiques et des tissus biologiques. Les applications touchent la sécurité, le rayonnement THz permettant par exemple la détection de métaux à travers les matières plastiques, le papier ou les tissus, opaques à la lumière visible. Elles touchent également l'étude du vivant car l'absence de processus d'ionisation permet d'observer l'activité cellulaire et ses effets sans dommage pour le vivant, contrairement aux rayons X.
- dans le domaine du transport de l'information, les ondes THz pourraient s'avérer utiles pour les *communications de proximité*, car l'inconvénient de leur absorption par l'atmosphère peut devenir un avantage pour des communications de proximité sécurisées.
- d'une façon générale, de nombreuses substances chimiques organiques possèdent des signatures spectrales dans les fréquences THz, à l'état solide comme à l'état liquide ou gazeux. Ces dernières peuvent ainsi servir à définir de nouvelles générations de (nano-) capteurs ou (nano-) sondes pour l'*environnement* (détection de polluants), la *médecine* (visualisation de tumeurs) ou la *biologie* (tests sur l'ADN sans étape d'étiquetage).

Toutes ces perspectives d'application restent conditionnées à l'émergence de nouvelles technologies de production du rayonnement THz. Celles-ci doivent garantir un coût faible et une forte compacité. Pour cette raison, les composants à semiconducteur sont particulièrement prometteurs et font l'objet de recherches actives pour étendre leur capacité de rayonnement vers le THz. Leur fabrication nécessite cependant une centrale technologique - des salles blanches - ce qui réduit considérablement le nombre des acteurs académiques impliqués dans de telles recherches. Le GET, sans les avoir jamais exploitées à leur niveau, dispose de ressources rares en ce domaine: l'accès libre d'un des chercheurs du GET à l'une des centrales technologiques en optoélectronique les plus performantes en France, celle du CNRS au Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (LPN, site ALCATEL de Marcoussis), la présence dans le GET de plusieurs chercheurs impliqués de longue date dans la conception de composants optoélectroniques, le soutien d'équipes spécialisées en micro-ondes et en optique représentent de réelles opportunités. C'est pourquoi **PASTEL** se propose la réalisation de sources TeraHertz à semiconducteur basées sur de nouveaux matériaux récemment mis au

point au LPN. Outre son clair impact scientifique, le projet permettra de mieux asseoir la coopération existant entre le LPN et le GET, et d'exploiter des ressources technologiques d'accès difficile pour les centres de recherche de l'enseignement supérieur.

D'un point de vue scientifique, trois approches en compétition peuvent être distinguées parmi les sources THz par rapport auxquelles se situe le projet **PASTEL** :

- les **sources laser à semiconducteur**, qui produisent un faisceau cohérent de photons THz en mettant en œuvre de nouvelles hétérostructures semiconductrices dites « cascades quantiques ». Elles ne fonctionnent aujourd'hui qu'à basse température (10 K – 150 K), mais fournissent des puissances élevées, dans la gamme des mW, entre 2 et 4.5 THz. Elles progressent vite depuis leur apparition récente dans un champ de recherche très dynamique.
- la **multiplication de fréquence**, une approche classique du domaine des micro-ondes. Malgré un nombre élevé d'étages de multiplication, elle reste très intéressante dans le THz grâce à l'efficacité des composants actifs (diodes Schottky), mais délicate à maîtriser à la conception comme à la fabrication. C'est la meilleure approche issue de l'électronique, encore sans rivale pour les applications spatiales (détection de molécules). Elle peut fournir ~10 mW vers 400 GHz et encore quelques dizaines de microwatts au-delà de 1.5 THz.
- la **photogénération** dans des détecteurs ultra-rapides directement couplés à une antenne. Elle utilise des lasers dans le visible ou le proche infrarouge, sources optiques puissantes et faciles à focaliser, pour engendrer dans un photodétecteur des ondes électromagnétiques THz. Il s'agit soit de lasers impulsionsnels, produisant des transitoires THz sur un spectre large, soit de l'association de deux lasers continus monofréquences dont le battement produit une onde THz très pure. Cette approche est employée à température ambiante et n'exige pas de technicité très élevée. Ses performances en termes de rendement et de puissance (quelques microwatts vers 1 THz) sont devenues compétitives comparées à la multiplication de fréquence, grâce à la mise au point de nouvelles générations de photodétecteurs ultra-rapides capables de supporter des puissances optiques très grandes.

Cette dernière approche fait l'objet du projet **PASTEL**. L'objectif scientifique, à caractère amont, est d'étudier et développer une source de rayonnement THz monolithique dans la gamme 0.25-1.5 THz reposant sur la fabrication de photodétecteurs ultra-rapides à courant de saturation élevé, et couplés sur le même substrat à des antennes planaires assurant une bonne qualité de faisceau. Le projet a pour conséquence stratégique d'accéder aux moyens de technologie du LPN, pour réaliser en collaboration des dispositifs novateurs essentiellement conçus au GET. Dans cette perspective, **PASTEL** associe en complémentarité des dispositifs photoniques et électroniques selon une conception commune respectivement aux groupes GTO et RFM de Télécom Paris, et un apport original du LPN sur les matériaux.

[Etat de l'art : Deux filières sont apparues pour fabriquer des photodétecteurs à courant de saturation élevé:

- ◆ *l'une fonctionne en illumination par la surface à 1.5 μm : il s'agit des photodiodes UTC (Uni-Traveling Carrier), dont les fréquences de coupure à 3 et 10 dB atteignent respectivement 310 et 750 GHz, et le rendement quantique avoisine 6% [H. Ito & al, *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, S191 (2005)]¹. Leur fabrication nécessite plusieurs étapes technologiques requérant la maîtrise de dimensions submicroniques.*
- ◆ *l'autre fonctionne en illumination latérale et propagation guidée: il s'agit des photodétecteurs MSM (Métal-Semiconducteur-Métal) en ondes progressives. Ce second type de dispositif repose sur l'emploi de GaAs épitaxié à basse température (LT-GaAs), matériau qui possède une réponse impulsionsnelle très brève (temps de recombinaison des porteurs photocréés extrêmement court) et intense (bonnes propriétés de transport). Grâce à la propagation guidée, il est possible de réaliser des photodétecteurs LT-GaAs dont le rendement quantique (~8%) est pratiquement équivalent à celui de structures de photodétection classiques en illumination verticale de bande passante comparable (570 GHz), mais qui ont l'avantage de saturer pour des puissances optiques plus élevées [J. W. Shi & al, *IEEE Photonics Technology Letters*, **13**, 623 (2001)]². Par ailleurs, si le LT-GaAs absorbe la lumière principalement dans le très proche infrarouge (autour de 800 nm), son absorption reste assez forte à 1300-1500 nm et le rend utilisable, mais sous-optimal, aux longueurs*

*d'onde des systèmes de communication optiques. La fabrication de tels dispositifs est plus aisée que celle des photodiodes UTC car elle peut être abordée en usant de technologies micrométriques en optique UV standard. De nombreuses équipes étrangères et quelques équipes françaises ont développé une approche de ce second type à 800 nm avec des photoconducteurs planaires en LT-GaAs à éclairage par la surface, qui ne permettent pas de générer des densités de photocourant aussi élevées ni d'atteindre d'aussi bons rendements de conversion de la puissance. On peut citer des résultats marquants aux Etats-Unis au MIT (puissances générées de 3 μ W et 0.2 μ W à 0.85 THz et 2.7 THz respectivement, grâce à une étude très soignée du couplage du photodétecteur avec l'antenne) [S. M. Duffy & al, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **49**, 1032 (2001)]³. Des travaux sont aussi menés en Angleterre à l'Université de Cambridge en collaboration avec l'entreprise TeraView, très active en imagerie THz, ainsi qu'en Allemagne dans les universités de Braunschweig et de Francfort. En France, l'Université de Lille et l'Université du Littoral à Lille ont obtenu des résultats à l'état de l'art [E. Peytavit & al, Appl. Phys. Lett., **81**, 1174 (2002)]⁴ et THALES travaille sur le sujet, plutôt vers 1.1 μ m avec du LT-GaInAs [R. Czarny/GDR THz]⁵. L'Université de Californie (UCSB) a été pionnière pour l'utilisation de photodétecteurs de bon rendement en ondes progressives² et continue à s'y intéresser en collaboration avec l'Université de Taiwan à Taipei, dans la perspective du photomélangage [J. W. Shi & al, Appl. Phys. Lett., **81**, 5108 (2002)]⁶. Une variante de cette approche employant un photodétecteur interdigité a été proposée en Allemagne à l'Université de Cologne, sa mise en œuvre vient de démontrer son efficacité (puissance générée supérieure à 1 μ W à 0.71 THz) [M. Mikulics & al, Appl. Phys. Lett., **88**, 041118 (2006)]⁷.*

La motivation principale pour s'engager dans la fabrication de tels dispositifs réside dans l'étude d'un **système d'imagerie THz**, pour les domaines d'application mentionnés plus haut. La mise en place d'un montage expérimental dédié à cette fin sans équivalent au niveau national est un but à moyen terme. PASTEL a aussi un objectif d'innovation en amont faisant appel à un savoir-faire du LPN concernant des matériaux semiconducteurs à faible durée de vie de porteurs sensibles à 1.3-1.5 μ m, pour des applications d'émission et de régénération dans les systèmes de communication par fibre optique à haut débit. La sensibilité dans l'infrarouge permettant le raccordement optique des dispositifs à ces systèmes et à leurs sources, l'impact de la photogénération THz peut s'en trouver notablement augmenté.

Contenu scientifique

Dans la démarche suivie, les approches de conception seront validées au moyen d'outils de simulation disponibles, les dispositifs seront réalisés dans la Centrale de Technologie du LPN, puis caractérisés sur un montage expérimental qui sera mis en place à Télécom Paris:

- la conception se fera en appliquant au domaine THz le savoir-faire existant à Télécom Paris dans le groupe RFM sur les circuits micro-ondes et les antennes. Grâce à des essais à l'échelle ~ 10 , la géométrie et les dimensions des éléments de circuit et de l'antenne seront définis de façon à maximiser le couplage de la puissance générée dans le composant actif vers le rayonnement THz émis dans l'espace libre³. Ce composant actif² sera illuminé par un laser dans le proche infrarouge. Le montage complet de caractérisation sera installé dans le groupe GTO. Il reposera sur une source impulsionnelle accordable en longueur d'onde, acquise en 2005, et des techniques de mesure par échantillonnage électro-optique familières à cette équipe [P.O. Mueller, D. Erasme, B. Huyart, IEEE Trans. on Microwave Theory & Technique, **47**, 308 (1999)]⁸. Il faudra aussi mettre en œuvre un dispositif de détection analogue à celui d'émission, dans une perspective d'imagerie en transmission à travers un échantillon.
- la fabrication des composants exigera de mettre au point au LPN une technologie planaire de photodétecteurs ultra-rapides en ondes guidées, sur des couches épitaxiées au LPN. Une contribution devra être apportée aux étapes d'épitaxie et d'élaboration technologique selon les procédures de ce laboratoire en s'appuyant, en épitaxie, sur un chercheur expérimenté du LPN (J. C. Harmand), en technologie, sur le savoir-faire et le soutien de la Centrale de Technologie et d'un enseignant-chercheur du groupe GTO ayant accès à l'ensemble des moyens de fabrication requis [C. Minot & al, Physica E, **17**, 294 (2003)]⁹.

Le résultat attendu est ainsi la mise en place des éléments d'une chaîne d'émission-réception dans le domaine THz, permettant de jeter les bases d'une expérience d'imagerie THz à balayage en transmission. La durée du projet doit permettre d'effectuer tout le cycle d'études et d'expérimentations décrit ci-dessus, et de présenter à l'échéance des évaluations quantitatives précises des performances visées pour cette expérience en termes de puissances optiques, rendements quantiques et résolutions spectrale et spatiale (voir calendrier).

Par rapport aux travaux effectués ailleurs, l'originalité de **PASTEL** reposera sur les matériaux nouveaux à faible durée de vie de porteurs développés au LPN (nitrures dilués dans les semiconducteurs III-V, matériaux épitaxiés à basse température et contenant des dopants profonds) pour les gammes de longueur d'onde des applications aux télécommunications [Le Dû & al, Appl. Phys. Lett., **88**, 201110 (2006)]¹⁰. Concernant les antennes conçues par RFM, le projet permettra de valider les approches et les paramètres (constantes diélectriques, pertes...) utilisés dans la conception, étape indispensable à la maîtrise du savoir-faire à des fréquences pour lesquelles la communauté scientifique ne dispose souvent que de données fragmentaires.

Conformité de la proposition aux critères de sélection

Excellence scientifique et technique, innovation :

La recherche proposée porte sur un domaine spectral encore peu exploré, susceptible d'offrir de grandes opportunités d'innovation tant en matière de composants que d'applications, actuellement très soutenu dans les pays développés, dans lequel le GET devrait être présent. L'action s'appuie sur des savoir-faire antérieurs. Certains comme l'épitaxie et la technologie au LPN requièrent des moyens lourds et rares auxquels **PASTEL** permettra d'accéder si nécessaire en d'autres occasions grâce à l'expérience acquise. Les équipes du projet sont composées de chercheurs expérimentés ayant fourni antérieurement des contributions reconnues⁸⁻¹⁰. Ce sont des partenaires publics actifs d'industriels des composants pour les systèmes de communication (projet CARRIOCAS de [System@tic](#)) et, pour le LPN, un établissement phare du CNRS en tant que laboratoire hébergeant l'une des cinq centrales du réseau national des centrales de technologie publiques, aussi en lien avec le laboratoire III-V Labs commun à ALCATEL et THALES. Enfin, l'ensemble des moyens nécessaires pour mener à bien le projet est réuni. Utilisés en vue d'un objectif commun, concrétisé dans des objets réels, ils apportent une plus-value aux groupes RFM et GTO, et aussi au LPN.

Qualité de l'apport de l'action de recherche aux Projets Structurants auxquels elle contribue:

L'action de recherche contribue aux Projets Structurants SOIF et INRA portés par les groupes GTO et RFM. Elle est en complète adéquation avec les objectifs de SOIF: études amont, développement de nouvelles fonctions optoélectroniques, technologies diffusantes. Elle répond aussi pleinement à l'objectif affiché dans INRA de recherche de nouveaux concepts pour étendre les capacités des systèmes d'émission et de réception par voies hertziennes.

Aspects stratégiques et impact, potentiel de valorisation, effets de levier:

Une fois les études amont effectuées et validées, l'expérience d'imagerie THz visée est susceptible de rattacher le projet **PASTEL** aux Pôles de Compétitivité Cap Digital (vie numérique, projet [Infom@gic](#) pour lequel Télécom Paris participe au domaine Image) ou System@tic (sécurité-défense, projet [System@tic/SIC](#), surveillance de zones sensibles, contrôle de passagers, dans lequel le GET est impliqué), et de constituer une vitrine pour former des partenariats bilatéraux sur des projets éligibles à l'attribution du label CARNOT avec des industriels des champs des télécoms ou de la défense (ALCATEL, THALES qui participent au projet IST [TeraNova](#), indicateur de l'intérêt de l'Europe pour la recherche sur

les THz), voire de la biologie (biopuces THz) ou du médical (imagerie en champ proche).

Justification du financement sur crédits groupe:

L'action doit permettre de capitaliser sur plusieurs savoir-faire (technologies de fabrication, composants optoélectroniques, antennes, contrôle de l'émission aux fréquences THz). Ces compétences interdisciplinaires sont bien implantées dans la communauté scientifique nationale (GDR THz, GDR Ondes...) et européenne (NoE SANDIE au LPN). L'expérience d'imagerie THz qui les réunira constituera un premier noyau d'activité dans ce champ, susceptible de participer ultérieurement aux appels d'offre ANR grâce à la reconnaissance de sa communauté scientifique. Cette dernière se développe en effet et s'organise (naissance en 2005 du [GDR THz](#) sur les sources et détecteurs THz) autour d'équipes dynamiques (lasers THz à Paris 7, nanotransistors THz à Lille et Montpellier, Radioastronomie THz à l'Observatoire de Paris...), sans que les techniques d'imagerie classique y soient encore nettement représentées. Il est donc opportun d'y investir.

Qualité de l'organisation et du pilotage:

Le projet **PASTEL** organisera au moins une réunion d'ensemble par trimestre. Christophe Minot, implanté au LPN, assurera l'interface avec ce laboratoire.

Tâche 1 (T1)	Tâche 2 (T2)	Tâche 3 (T3)
Conception Télécom Paris RFM + C. Minot + ¼ CDD	Epitaxie – Technologie LPN Centrale LPN + C. Minot + ½ CDD	Caractérisation Télécom Paris GTO + ¼ CDD

Calendrier

- t₀ → t₀+3: T1 : Conception du photodétecteur, de l'antenne et des circuits associés.
T2 : Formation et essais technologiques. Epitaxie LT-GaAs.
- t₀+3 → t₀+6: T2 : Technologie sur LT-GaAs. Epitaxie nouveaux matériaux.
T3 : Mise en place de l'expérience de caractérisation
- t₀+6 → t₀+9: T2 : Technologie sur nouveaux matériaux.
T3 : Caractérisation des dispositifs réalisés.
- t₀+9 → t₀+12: T1 : Ajustement de la conception.
T2 : Epitaxie et technologie selon la nouvelle conception.
T3 : Caractérisation et évaluation de performance des dispositifs. Montage d'imagerie et premiers essais.

Budget et implications des équipes :

GTO: 10k€

Investissement 8 k€

- positionneur 3D pour sonde optique

Fonctionnement (missions) 2 k€

Permanents impliqués (H-M): C. Minot (2) (coordination, encadrement, expertise), D. Erasme (1) (expertise), B Thedrez (0.5) (expertise).

RFM: 10k€

Investissement 8 k€

- bases de mesure, lignes coaxiales pour essais à fréquence ~1/10

Fonctionnement (missions) 2 k€

Permanents impliqués (H-M): B. Huyart (0.5) (expertise), X. Begaud (0.5) (expertise)

GTO + REM

Personnel

12 mois CDD