



HAL
open science

LPICM - Laboratoire de physique des interfaces et des couches minces

Rapport Hcéres

► **To cite this version:**

Rapport d'évaluation d'une entité de recherche. LPICM - Laboratoire de physique des interfaces et des couches minces. 2014, École polytechnique - X, Centre national de la recherche scientifique - CNRS. hceres-02033377

HAL Id: hceres-02033377

<https://hal-hceres.archives-ouvertes.fr/hceres-02033377>

Submitted on 20 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



agence d'évaluation de la recherche
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

Évaluation de l'AERES sur l'unité :

Laboratoire de Physique des Interfaces et des
Couches Minces

LPICM

sous tutelle des
établissements et organismes :

École Polytechnique

Centre National de la Recherche Scientifique – CNRS



Janvier 2014



agence d'évaluation de la recherche
et de l'enseignement supérieur

Section des Unités de recherche

Pour l'AERES, en vertu du décret du 3 novembre 2006¹,

- M. Didier HOUSSIN, président
- M. Pierre GLAUDES, directeur de la section des unités de recherche

Au nom du comité d'experts,

- M. François TEMPLIER, président du comité

¹ Le président de l'AERES « signe [...], les rapports d'évaluation, [...] contresignés pour chaque section par le directeur concerné » (Article 9, alinea 3 du décret n°2006-1334 du 3 novembre 2006, modifié).



Rapport d'évaluation

Ce rapport est le résultat de l'évaluation du comité d'experts dont la composition est précisée ci-dessous.

Les appréciations qu'il contient sont l'expression de la délibération indépendante et collégiale de ce comité.

Nom de l'unité :	Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces
Acronyme de l'unité :	LPICM
Label demandé :	UMR
N° actuel :	7647
Nom du directeur (2013-2014) :	M. Pere ROCA i CABARROCAS
Nom du porteur de projet (2015-2019) :	M. Pere ROCA i CABARROCAS

Membres du comité d'experts

Président : M. François TEMPLIER, CEA-LETI Grenoble

Experts : M^{me} Jumana BOUSSEY, CNRS Grenoble

M. Gérard GRANET, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

M. Lionel HIRSCH, ENSCPB Bordeaux

Délégué scientifique représentant de l'AERES :

M. Olivier BONNAUD

Représentant(s) des établissements et organismes tutelles de l'unité :

M. Pierre LEGRAIN (directeur de l'École Doctorale de l'École Polytechnique n°447)

M. Patrick LE QUERE, École Polytechnique

M. Laurent NICOLAS, CNRS (INSIS)



1 • Introduction

Historique et localisation géographique de l'unité

Le Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces (LPICM), localisé à l'École Polytechnique à Palaiseau, a été fondé en 1986 et il est devenu l'UMR 7647 en 1997. Au cours des années suivantes, il a été associé successivement aux départements CNRS SPI, STIC et ST2I, pour aujourd'hui appartenir à l'INSIS (Institut des Sciences de l'ingénierie et des Systèmes) comme institut principal, tout en ayant un partenariat avec les Instituts de Physique et de Chimie. Le Laboratoire a connu une croissance importante depuis sa création, en passant d'initialement 19 personnes à près de 110 aujourd'hui.

Équipe de direction : M. Pere ROCA i CABBARROCAS (directeur), M. Yvan BONNASSIEUX (sous-directeur), M. Costel Sorin COJOCARU (sous-directeur).

Nomenclature AERES

ST6 Sciences et technologies de l'information et de la communication

ST5 Sciences pour l'ingénieur

ST2 Physique

Effectifs de l'unité

Effectifs de l'unité	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
N1 : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés	4	4
N2 : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés	15 (14)	15 (14)
N3 : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)	20 (19.8)	24
N4 : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)	1	1
N5 : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.)	15 (14.5)	3 (2.5)
N6 : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)	6	6
TOTAL N1 à N6	61 (59.3)	53 (51.5)



Effectifs de l'unité	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
Doctorants	31	
Thèses soutenues	31	
Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	10	
Nombre d'HDR soutenues	4	
Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées	14	13

2 • Appréciation sur l'unité

Avis global sur l'unité

La LPICM est un laboratoire dynamique qui n'a cessé de croître depuis sa création en 1986, et notamment pendant la période échue au cours de laquelle les effectifs sont passés de 84 à près de 110 personnes. Il regroupe de façon très vivante des personnes de 24 nationalités différentes.

Le LPICM a obtenu des résultats scientifiques très significatifs, depuis les matériaux et composants pour le photovoltaïque, la modélisation des dispositifs organiques, la croissance de nanomatériaux et leur intégration dans des composants avancés, jusqu'aux méthodes de caractérisation optique appliquées désormais au domaine biomédical. Ces résultats, qui ont pu être valorisés par une production scientifique de tout premier plan sont notamment la conséquence d'une force du laboratoire qui est de disposer de la chaîne complète depuis la mise en œuvre du matériau jusqu'à la caractérisation du composant complet. La recherche se fait via des partenariats forts et pérennes, avec des industriels très renommés, qui se développent dans un cycle vertueux. Ainsi ce laboratoire adresse aujourd'hui deux enjeux sociétaux importants que sont l'Énergie et la Santé. Les perspectives sont très positives tant en termes d'objectifs scientifiques que des moyens pour les atteindre.

Aujourd'hui le LPICM vit certainement une période charnière, car d'une part la période de croissance des effectifs paraît révolue, d'autre part il va devoir gérer des départs à la retraite prévisibles. Cela constituera probablement son principal challenge pour la période à venir.

Points forts et possibilités liées au contexte

Le LPICM a la force rare de posséder la chaîne complète depuis la mise en œuvre des matériaux avancés jusqu'aux composants complets. Cela concerne désormais aussi l'équipe Orgatech qui a recruté des chimistes. Atout supplémentaire, le LPICM développe ses propres instruments, pour la fabrication des échantillons, mais aussi pour leur caractérisation et les diagnostics.

Le Laboratoire a une richesse de partenariats considérable : par le nombre, par la taille de certains d'entre eux (ERC), par la pérennité, et par les ressources (notamment le financement) qu'ils apportent.

En dépit d'une variété thématique assez marquée, il existe une très forte cohésion, une implication de tous, et un dynamisme collectif visible.

L'implication très forte de ses membres dans la formation par la recherche, associée à son attractivité, lui permet notamment d'alimenter un vivier de doctorants et futurs chercheurs.

Points faibles et risques liés au contexte

Le LPICM pâtit d'une certaine dispersion géographique (actuellement 6 localisations), qui devrait s'accroître avec la mise en place de l'Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF).



Le départ prévu ou prévisible de chercheurs à la retraite présente un risque, notamment dans l'équipe Caractérisations Optiques au sein de laquelle ils sont proportionnellement nombreux et qu'une forte expertise repose sur eux.

Bien que très positif globalement, le partenariat avec Total, axé sur les cellules à base de Si Mono (Silicium monocristallin), peut induire le risque de plus ou moins imposer au LPICM des thèmes de recherche s'écartant de son cœur d'expertise

Recommandations

Le comité d'experts encourage l'ensemble des membres du LPICM à poursuivre leur activité avec le talent, l'implication et le dynamisme qui ressort de la période passée, et qui a permis au laboratoire d'être au niveau d'excellence constaté.

Pour l'équipe Nanosil, dans le cadre d'ERC, notamment industriels, il faut être attentif et s'efforcer de toujours pouvoir mener des recherches utilisant et développant le cœur de compétence spécifique des équipes. Dans le même temps, il faut être prêt à réduire certains thèmes de recherche si le nombre de chercheurs effectifs stagne ou diminue.

L'équipe ORGATECH pourrait développer des interactions plus fortes avec les équipes du laboratoire, qui pourront également déboucher sur des approches originales et de rupture, notamment en ce qui concerne la caractérisation des cellules solaires. Une analyse du positionnement de l'équipe par rapport aux autres laboratoires d'électronique organique pourrait aider à centrer les activités de l'équipe sur son cœur de compétences. Sa visibilité serait grandement améliorée.

Il serait profitable à l'équipe NanoMaDe de rejoindre le réseau Groupement de Recherche (GDR) (et le Groupement de Recherche International- GDRi) Nanotubes et Graphène, pour une meilleure cohérence et une plus grande concertation avec les autres acteurs nationaux et internationaux du domaine.

Il apparaît important pour l'équipe Caractérisation Optiques de veiller à consolider et à valoriser encore davantage son savoir-faire de premier plan dont elle dispose aujourd'hui. Elle pourra ainsi surmonter le problème récurrent des moyens humains et avoir un rôle moteur pour fédérer autour d'elle d'autres acteurs.



3 • Appréciations détaillées

Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

Le LPICM a publié, sur la période 2008-2013, 415 articles dans des revues à comité de lecture et 50 conférences invitées dans des congrès internationaux.

Les articles qui ont le plus d'impact sont souvent ceux liés au cœur d'expertise des équipes : pour NanoSil, le dépôt de silicium en couches minces à basse température et les cellules photovoltaïques ; pour Orgatech, la modélisation physique et compacte des composants organiques, la conception de transistors et diodes organiques ; pour NanoMade, la croissance et l'intégration de matériaux et nano-objets à faible dimensionnalité (nanofils, nanotubes de carbone, graphène) ; pour Caractérisation Optiques, la polarimétrie de Mueller.

C'est dans ces domaines que les articles sont les plus innovants et aussi les plus cités.

Les revues choisies par les membres du laboratoire pour diffuser leurs résultats sont dans l'ensemble de très bon niveau et à fort impact. On peut citer pour les différentes équipes : Progress in Photovoltaics - Research and Applications, Plasma Sources Science and Technology, Journal of Applied Physics, Nanotechnology, ACS Nano, Advanced Materials, Carbon, APL, Optics Express et Optics Letters.

Certaines publications montrent par ailleurs une activité collaborative importante car de nombreux articles émanent de collaborations avec d'autres partenaires (issus des projets ANR et FP7).

Le nombre de brevets, se montant à 29 sur la période de référence, est significatif, et témoigne de la réussite de la politique partenariale du Laboratoire. Ce sont les équipes Nanosil et NanoMade qui sont à l'origine de la plupart de ces brevets, notamment grâce à leurs activités liées aux équipements de dépôt PECVD et aux collaborations dans les domaines de l'électronique et du photovoltaïque.

Globalement la production et la qualité scientifiques du LPICM sont donc d'un très bon niveau.

Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Le LPICM a participé à un nombre très significatif de projets internationaux (FP6, FP7) et nationaux (ANR, FUI/OSEO), le Laboratoire était coordinateur sur un tiers de ces projets, ceci témoignant de sa renommée dans les domaines concernés. L'implication dans des collaborations internationales est aussi très marquée, de l'Amérique jusqu'à l'Asie.

Ce dynamisme partenarial a considérablement facilité la participation du LPICM à deux Equipex et un Labex.

L'attractivité du Laboratoire s'est illustrée par l'arrivée d'un chercheur pionnier de l'électronique organique et elle s'en est retrouvée renforcée. Un autre pionnier, dans le domaine de l'AFM (Atomic Force Microscopy) cette fois, y a séjourné six mois. Sa venue a ouvert des perspectives novatrices et extrêmement prometteuses pour la TERS (Tip Enhanced nanoRaman Spectroscopy).

Fait marquant, un membre a obtenu la médaille d'Argent du CNRS en 2011 pour l'ensemble de ses travaux sur le dépôt de Silicium, ainsi que le prix d'Innovation de l'Ecole Polytechnique en 2010. Ce dernier prix a aussi été attribué pour un brevet sur le colposcope polarimétrique.

L'indicateur le plus révélateur de l'attractivité du LPICM est peut-être finalement le nombre de nationalités qui le compose : 24 au total ! Ceci illustre la richesse de la sphère de recrutement permise par son rayonnement. Cette richesse donne en retour un réseau de collaborations considérable avec le monde entier.

Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

La richesse des partenariats industriels du LPICM est exceptionnelle, autant du point de vue quantitatif (certains incluent des équipes de recherche communes « ERC ») que qualitatif : depuis les PME jusqu'aux grandes sociétés nationales et internationales. Le numéro un mondial des écrans plats, Samsung, est notamment venu chercher la compétence et la renommée du LPICM dans le domaine des TFT (Chaire). Le LPICM a initié sa collaboration avec Total en 2009. Cette collaboration est d'envergure (7 chercheurs du partenaire présents au LPICM)



et pérenne (renouvellement de 4 ans en cours de signature). Avec la création de l'IPVF, qui est en grande partie due au partenariat initial LPICM-Total, le rayonnement du LPICM sera renforcé.

En plus des résultats scientifiques, de nombreux brevets ont été déposés, sécurisant la propriété intellectuelle d'une future industrialisation. Il se développe même et s'élargit, par l'établissement de l'IPVF. Une collaboration est toujours menée avec le partenaire historique, la société Solems.

Autres exemple de collaboration efficace, celle d'Orgatech avec PSA, qui repose sur un contrat de longue durée (5 ans) avec des moyens associés, et celle avec le CEA (détachement d'un chercheur du CEA dans les locaux du LPICM depuis 2007). La collaboration avec Renault SA a permis à l'équipe NanoMaDe de marquer une grande innovation en réalisant des batteries Lithium-ions à haute performance grâce aux nano-objets développés par cette équipe.

Le partenariat industriel avec Thales R&T, datant de la création de l'équipe NanoMaDe et qui est toujours en cours, permet à l'équipe d'accéder à une infrastructure technologique à l'état de l'art au sein de l'entreprise. Il a donné lieu à d'importantes valorisations dans les domaines de l'électronique et de l'optoélectronique. Sa pérennité est confirmée via le projet européen CE-Graphene-Flagship, qui amorce de nouvelles perspectives de recherche sur la synthèse et l'intégration du graphène. C'est aussi le cas du partenariat initial avec IFSTTAR qui s'ouvre maintenant vers d'autres partenaires.

La promotion de l'utilisation de la polarimétrie de Mueller en tant qu'outil de métrologie et de caractérisation est à mettre au crédit de l'équipe Caractérisations Optiques du LPICM : ses compétences sont recherchées par des entreprises leader avec laquelle elle collabore de longue date. Les compétences de cette équipe sont très fortement distribuées au sein des autres équipes du laboratoire.

En caractérisation optique, un partenariat privilégié est conduit avec l'Institut Mutualiste Montsouris, par la mise en service d'un polarimètre pour l'imagerie. L'équipe bénéficie du soutien de deux chefs de service de l'Institut pour l'interprétation des images polarimétriques de tissus. Deux autres polarimètres sont présents chez d'autres partenaires. L'équipe a aussi collaboré avec le leader mondial en nanolithographie pour la microélectronique.

Le LPICM a donc un impact particulièrement fort sur l'environnement économique et social dans le domaine des énergies renouvelables, de l'électronique organique, et du domaine de la santé, qui constituent des enjeux sociétaux importants.

Appréciation sur l'organisation et la vie de l'unité

Les effectifs du laboratoire ont augmenté significativement entre 2007 et 2013 : de 84 à 108 personnes, et pour l'essentiel au profit de permanents (de 29 à 48). Cet accroissement est le résultat notamment de la mise en place de collaborations, dont celle avec le CEA-LITEN en 2007 (fondation d'Orgatech) et surtout avec Total en 2009 (d'où 7 chercheurs sont venus accroître le nombre des permanents). Il est intéressant de noter que la croissance s'est faite sur les 4 équipes, notamment celle des caractérisations optiques.

Ce recrutement s'est fait pour l'essentiel auprès d'autres laboratoires de recherche ce qui confirme la grande attractivité du LPICM.

Le laboratoire est organisé en 4 équipes de recherche. Ces équipes bénéficient du support de trois équipes support : administration, électronique et informatique, conception technique. Les ressources sont aussi critiques dans les équipes support et c'est aussi grâce à leur forte implication et motivation que le laboratoire peut fonctionner. Une des forces du laboratoire est en effet de pouvoir réaliser en interne ses outillages et certains équipements. La limitation sur les permanents est en partie compensée par l'attractivité du laboratoire qui réussit à attirer de nombreux doctorants et post-doc (50 au total).

En 2012, un événement important pour la vie du laboratoire a été le changement de directeur. Le nouveau directeur, issu du laboratoire, a laissé sa place de responsable de l'activité NanoSil à un jeune chercheur. Plus d'un an après la mise en place de la direction actuelle, la nouvelle organisation paraît très bien en place, et surtout très appréciée du personnel.

L'évolution pour les années à venir paraît un peu délicate en raison du départ prévisible à la retraite de plusieurs chercheurs et aux difficultés d'en recruter de nouveaux. A plus court terme, le départ à la retraite d'une personne de l'équipe administrative suscite une inquiétude marquée de l'ensemble des personnels permanents.



Le comité d'experts a la perception, à l'issue de sa visite, d'un laboratoire au sein duquel les membres se sentent bien, sont très impliqués et interagissent beaucoup.

Le laboratoire est actuellement réparti sur 7 sites tous situés sur le "Plateau" : ailes 0, 2, 4 ; bâtiments 404, 406, 408 de l'École Polytechnique ; Thales TRT. Ceci n'est pas optimal pour l'interaction entre équipes. Pour y pallier, de nombreuses rencontres sont organisées : séminaires de labo délocalisés (deux jours, tous les deux ans), assemblées générales (au moins 2 par an), conseil de laboratoire (au moins 3 fois l'an), séminaires hebdomadaires (présentations internes et de chercheurs étrangers), séminaires des doctorants.

De nouveaux locaux seront construits dans le cadre de l'IPVF (9.000 m² prévus pour 2016) ce qui pourrait bénéficier à l'équipe NanoSil. A plus court terme, la rénovation de l'aile 4 pourra permettre d'optimiser l'espace. Ces évolutions (surtout la première) pourraient ponctuellement perturber l'activité de recherche, puis créer un certain isolement de l'équipe NanoSil avec le reste du Labo.

La liste très longue des équipements du laboratoire reflète le dynamisme des personnels qui ont pu bâtir ces plateformes uniques. Au total, ce sont 6 plateformes de recherche qui fédèrent ce parc (Couches Minces, NanoMAX, Orgatech, Nanomatériaux, Caractérisation Optique, PVSIXT).

Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

31 doctorants ont soutenu leur thèse sur la période, et 31 sont en cours de thèse.

Des membres de l'équipe ont été à l'origine de la création récente du M2 « Renewable Energy Science and Technology ». Aujourd'hui, de nombreux membres du laboratoire y sont impliqués : en plus de la direction de programme, 3 membres de l'équipe y assurent des cours et de la coordination pédagogique. Ce master a fourni au LPICM pas moins de 4 étudiants actuellement en thèse dans l'équipe.

L'implication à l'École Polytechnique (cycles ingénieurs et Master) est aussi significative avec de nombreux chercheurs y assurant des cours et l'un d'entre eux assurant la direction des études depuis Novembre 2012. Un autre membre, Professeur associé au département de Physique, y est responsable des Masters.

Le responsable de l'équipe Orgatech est directeur du Master commun École Polytechnique / Kyung Hee University de Seoul.

Les chercheurs du laboratoire ont contribué à la création de nouvelles entités au sein de l'Université Paris Saclay, notamment le Département d'Ingénierie Optique et d'Electronique et les Écoles doctorales associées.

D'une façon globale, le laboratoire est donc particulièrement impliqué dans la formation par la recherche sur l'énergie solaire, cœur de son activité.

Il faut souligner que de nombreux membres impliqués dans les enseignements le sont aussi dans le transfert des résultats de la recherche au niveau des enseignements. C'est une excellente stratégie, non seulement pour le devenir professionnel des étudiants mais aussi pour attirer les meilleurs d'entre eux en thèse.

L'ensemble des thèmes de recherche des Laboratoires de l'École Polytechnique, dont le LPICM, est rattaché à l'unique École Doctorale de l'École Polytechnique (EDX), dont le numéro est ED 447.

Tel qu'a pu le constater le comité d'experts lors de son entretien avec le directeur de l'ED, les liens entre le LPICM et l'école doctorale sont très bons. La formation par la recherche traduit le dynamisme du laboratoire qui compte 14 personnes habilitées à diriger des recherches. Elle se caractérise par une bonne diversité des financements. L'équipe accueille de très bons doctorants étrangers dont les travaux de thèses semblent être le pivot de collaboration à l'international (Universités Coréenne et Singapourienne notamment). Enfin, l'insertion dans la vie professionnelle des docteurs formés par le laboratoire semble se faire majoritairement dans le monde industriel (en France et à l'Étranger) ce qui est en parfait accord avec l'esprit de recherche collaborative du LPICM.



Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Pour la période à venir, l'équipe NanoSil accentue la focalisation sur le photovoltaïque à base de Silicium. Avec la poursuite prévue du partenariat avec Total, la recherche sur les cellules à base de substrats de Silicium peut se pérenniser, avec une base plutôt incrémentale. Sur ce type de collaboration, il peut y avoir un risque que les axes de recherches soient au moins en partie guidés par des préoccupations relativement court-terme. Dans l'approche 'couches minces', les recherches visées sont plus en rupture, mais l'équipe poursuit sur son cœur de savoir-faire, via d'autres partenariats bien établis.

Dans le même temps, l'équipe se réserve des thèmes de recherche plus amont autofinancés et garde pour objectif le développement de son savoir-faire dans la chaîne de la valeur du procédé plasma depuis les sources jusqu'à la modélisation.

Un des objectifs de l'équipe Orgatech est de poursuivre dans le domaine du photovoltaïque organique, dont les enjeux industriels sont importants. Cependant il y est difficile d'apporter une rupture technologique tant la concurrence est grande sur ce sujet. D'autre part la fiabilité est encore un obstacle significatif pour l'application. L'équipe compte sur l'essor des circuits organiques pour développer et enrichir son expertise sur la modélisation, sujet propice à l'innovation et au transfert industriel. Pour valider ces modèles, il pourra être utile de renforcer des collaborations avec des plateformes semi-industrielles telles que PICTIC au CEA-LITEN. Les semiconducteurs organiques offrent des potentialités pour la conception de nouveaux capteurs (ou actionneurs) pour des applications dans le domaine la biologie, et l'équipe compte les développer, avec des ruptures technologiques (ou conceptuelles) à la clé.

Pour l'équipe NanoMade, le projet de recherche consiste, d'un côté, à poursuivre les études en amont sur la croissance de nano-fils de semiconducteurs et, de l'autre, à les intégrer dans divers démonstrateurs issus des secteurs applicatifs. L'arrivée en 2016 de la deuxième tranche de Fenix donnera accès à de nouvelles perspectives de recherches. Si les applications visées dans le domaine des batteries sont claires et conformes aux grandes orientations du domaine, celles relatives au développement de capteurs environnementaux restent relativement vagues et généralistes. Les partenariats proposés s'inscrivent dans la continuité du contexte actuel et les cadres collaboratifs proposés sont bien éprouvés et crédibles.

La polarimétrie de Mueller est aujourd'hui arrivée à maturité, et l'équipe Caractérisation Optique compte, pour la période avenir, continuer à l'implémenter dans des applications afin de tester et valoriser les acquis théoriques. Le diagnostic biomédical est aujourd'hui au centre de son activité. La scattérométrie polarimétrique des objets périodiques évoluera vers des activités plus transversales au sein du laboratoire, et les activités NanoRaman seront poursuivies. La spécificité du groupe est ainsi préservée et assure sa réactivité vis à vis d'opportunités de collaboration.

En résumé, la stratégie de recherche du LPICM à cinq ans se présente, pour l'ensemble des équipes, en continuité globale de ce qui a été initié ces dernières années, aussi bien pour les activités historiques (NanoSil, Caractérisations Optiques) que celles créées plus récemment (Orgatech et NanoMade). Pour appliquer cette stratégie, les perspectives de financement paraissent globalement bonnes.



4 • Analyse équipe par équipe

Équipe 1 : Nanostructured Silicon (NanoSil)

Nom du responsable : M. Erik JOHNSON

Effectifs

Effectifs de l'équipe	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
N1 : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés	1	1
N2 : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés	6 (5.5)	5 (4.5)
N3 : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)	2	2
N4 : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)	1	1
N5 : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.)	8	1
N6 : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)	6	6
TOTAL N1 à N6	24 (23.5)	16 (15.5)

Effectifs de l'équipe	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
Doctorants	14	
Thèses soutenues	8	
Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	4	
Nombre d'HDR soutenues	1	
Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées	5	5

Appréciations détaillées

L'équipe NanoSil, est axée sur la mise en œuvre de matériaux en couches minces par procédé plasma, visant comme principale application les cellules photovoltaïques. C'est cette même activité qui a conduit à la création du laboratoire il y a une trentaine d'année. Elle maîtrise l'ensemble de la chaîne de compétences depuis les sources plasma, le dépôt des couches minces, jusqu'à la réalisation de composants applicatifs.

Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

Le laboratoire a obtenu des résultats très novateurs dans le domaine des sources plasma et des modes d'excitation, notamment en démontrant expérimentalement l'intérêt de la "Tailored Voltage Waveform" (application de RF avec formes d'ondes non-sinusoidales) : la possibilité de contrôler séparément le flux d'ions et l'énergie de bombardement des ions permet d'améliorer la cristallinité du silicium microcristallin, qui se répercute positivement sur la performance des cellules PV.

Une des activités phare de l'équipe a été l'épithaxie à basse température (<200°C) et par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), de couches de Si ou Ge. Le résultat le plus remarquable est qu'elle a pu ainsi obtenir des couches cristallines homo-épithaxiées de Si et de Ge, mais aussi hétéro-épithaxiées (Ge/Si) ayant une très bonne cristallinité et peu de défauts structuraux. Ces résultats, validés par la réalisation des cellules PV, se situent sans aucun doute à l'état de l'art mondial. La perspective de réaliser des jonctions radiales permet aussi d'envisager des cellules à très haute performance grâce à un rapport surface développée sur épaisseur très avantageux. Les nanofils de silicium ont donc été étudiés de façon intensive au LPICM (pas moins de trois thèses) pour cette application. Malgré la difficulté spécifique de contrôler la croissance de tels matériaux, les résultats ont aussi pu être effectivement validés sur des cellules.

L'équipe a également pu, via la modélisation dynamique des molécules, prédire la possibilité d'obtenir une molécule à base de silicium ayant un caractère aromatique, présentant de ce fait de nombreuses propriétés exceptionnelles, notamment de conduction.

D'une façon générale, l'équipe a développé un savoir-faire très large et sait mettre en œuvre le silicium sous des formes extrêmement variées, depuis l'amorphe, le nano et microcristallin, poly-cristallin, monocristallin "volumique", nano-fils, jusqu'au "polymorphe", intermédiaire entre l'amorphe et le nano-cristallin, acquis de la période considérée. Cette maîtrise et cette expertise aussi large du matériau silicium pour applications aux dispositifs électroniques place sans aucun doute le LPICM au meilleur niveau mondial. Ces résultats ont été valorisés par une production scientifique très significative incluant 156 publications avec comité de lecture, 35 conférences invitées et 18 brevets. Sur les 156 articles, 78 l'ont été dans des revues à facteur d'impact supérieur à 2, dont 23 à facteur supérieur à 5. En citations, 82 l'ont été plus de 5 fois, et 11 plus de 20 fois. Enfin 4 articles ont retenu l'attention des éditeurs et ont été mis en avant.

Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

L'équipe a participé à un nombre très significatif de projets internationaux et nationaux : 7 projets ANR, 6 projets européens, 3 FUI/OSEO. Le LPICM était coordinateur sur 4 de ces projets, ceci témoignant de la renommée de l'équipe dans le domaine. Samsung, numéro un mondial des écrans plats, est venu chercher la compétence et la renommée du LPICM dans le domaine des TFT, ce qui a donné la chaire NanoDix. Il entretient de nombreuses collaborations avec des unités locales : Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEP), Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (LPN), mais aussi à l'international (Université de Toronto).

Fait marquant, un membre a obtenu la médaille d'Argent du CNRS en 2011 pour l'ensemble de ses travaux sur le dépôt de Silicium, ainsi que le prix d'Innovation de l'École Polytechnique en 2010.

Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

La LPICM a initié sa collaboration avec Total en 2009. Cette collaboration est d'envergure puisqu'elle implique notamment 7 chercheurs du partenaire présents au LPICM. En plus des résultats scientifiques, de nombreux brevets ont été déposés, sécurisant la propriété intellectuelle d'une future industrialisation. Sa réussite, confirmée par le renouvellement du contrat (en signature), a conduit à l'établissement de l'IPVF qui implique bien d'autres partenaires (CNRS, École Polytechnique, Total, EDF, Riber, Air Liquide et Horiba/Jobin Yvon). Une collaboration est toujours menée avec le partenaire historique Solems. Un projet multipartenaires (ArcelorMittal, Total, EdF, GdF Suez) a aussi été mené sur l'épithaxie sur supports en alliages FeNi.

Le laboratoire a développé un nombre important d'innovations au niveau des sources plasma et modes d'excitation : boîte d'accord multi-fréquence, pulses nanoseconde, ... Le mérite est que ces innovations ont été portées du concept de laboratoire jusqu'aux vraies machines de dépôt, et le plus souvent sous la forme d'une collaboration avec des industriels. Le LPICM est membre du réseau des Plasmas Froids, et de FedPV, réseau CNRS pour lequel il a organisé la réunion annuelle Journées Nationale du PhotoVoltaïque (JNPV).



L'équipe NanoSil a donc un impact particulièrement fort sur l'environnement économique et social dans le domaine des énergies renouvelables, qui est enjeu sociétal important.

Appréciation sur l'organisation et la vie de l'équipe

L'équipe a connu des évolutions significatives qu'elle a su mener positivement sans impact sur son activité. Elle a bénéficié d'une forte croissance des effectifs, puisqu'elle s'est enrichie de trois recrutements, et de l'apport de l'équipe de 7 chercheurs du partenaire Total. Le nouveau directeur du LPICM est issu de l'équipe, dont il était responsable. Il a été remplacé à ce poste par un chercheur recruté en 2009. Chaque activité est pilotée par un chercheur ou un ingénieur de recherche, en fonction de la nature de celle-ci. Une réunion hebdomadaire réunit tous les acteurs et utilisateurs sur un thème donné.

Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

11 doctorants ont soutenu leur thèse sur la période, et 15 sont en cours de thèse. Le responsable de l'équipe a obtenu son HDR en Janvier 2013, portant à trois les titulaires de ce diplôme dans l'équipe.

Des membres de l'équipe ont initié et ont eu une contribution significative à la création du M2 « Renewable Energy Science and Technology ». La direction de programme du M2 est co-assurée par l'ancien directeur du LPICM et le responsable de l'équipe NanoSil, et trois membres de l'équipe y assurent des cours et de la coordination pédagogique. Le master ainsi créé a depuis fourni pas moins de 4 étudiants actuellement en thèse dans l'équipe. Trois chercheurs assurent des cours à l'École Polytechnique (cycles ingénieurs et Master). Un enseignant-chercheur est directeur des études depuis Novembre 2012, et responsable de la semaine européenne ATHENS « Photovoltaic Solar Energy » à l'ENSTA depuis 2011. Un autre membre, Professeur associé au département de Physique, y est responsable des Masters.

D'une façon globale, l'équipe est donc particulièrement impliquée dans la formation par la recherche sur l'énergie solaire, cœur de son activité.

Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

La stratégie de l'activité à cinq ans se focalise sur le photovoltaïque. Deux axes sont clairement identifiés et déterminés en fonction des partenariats : l'axe relatif aux cellules à base de substrats Silicium, exclusivement traité dans le cadre du contrat ERC avec Total, vise une recherche plutôt incrémentale. L'axe concernant les dispositifs en couches minces, vise quant à lui des avancées en rupture. Cette recherche s'appuie sur d'autres partenariats industriels via des financements européens ou nationaux.

Dans le premier cas (technologie wafer), le point très positif est qu'avec le contrat en cours de signature, le LPICM bénéficie d'un partenariat d'amplitude significative, pérenne, et avec un partenaire qu'il connaît bien. En contrepartie, il peut y avoir un risque que les axes de recherches soient au moins en partie guidés par des préoccupations relativement court-terme. Dans le même-temps, un certain facteur d'incertitude demeure sur la mise en place de l'IPVF qui reste à construire.

Dans le second cas, l'objectif est de rendre compétitives les cellules PV en couches minces, et dans cette perspective trois thèmes scientifiques sont identifiés, pour lesquels les financements semblent bons. Le LPICM pérennise ici son expertise historique qui vise à étudier et valoriser le silicium en couches minces sous toutes ses formes.

Dans le même temps, l'équipe se réserve des thèmes de recherche plus amont autofinancés : la poursuite de l'activité de recherche sur la molécule Si aromatique (étude d'autant plus pertinente qu'elle combine fort intérêt scientifique et potentiel applicatif considérable), les cellules PV à base de nanofils, et les dispositifs électro/photo luminescents.

Enfin, l'équipe garde pour objectif de poursuivre le développement de son savoir-faire dans la chaîne de la valeur du procédé plasma depuis les sources jusqu'à la modélisation et les caractérisations associées, avec un focus marqué sur la technique TVW à laquelle il croit, à juste titre, beaucoup.



Conclusion

- *Points forts et possibilités liées au contexte :*

L'équipe maîtrise complètement la chaîne depuis les sources plasma jusqu'aux composants.

Elle dispose d'une expertise unique au monde, du « silicium sous toutes ses formes », validée par des résultats scientifiques de tout premier plan et valorisée par une excellente production scientifique.

Elle a mis en place des partenariats forts et pérennes avec des industriels et des Instituts renommés.

Les objectifs pour la période avenir sont bien établis, ambitieux, cohérents, avec des bonnes perspectives de financement.

- *Points faibles et risques liés au contexte :*

Les thèmes de recherche sont au total très nombreux par rapport à l'effectif, il y a un risque de dispersion s'il se stabilise ou diminue.

- *Recommandations :*

L'équipe doit être prête à réduire certains thèmes de recherche si le nombre de chercheurs effectifs stagne ou diminue. Elle doit être vigilante sur le fait de ne pas se faire imposer des thèmes de recherche de faible intérêt scientifique ou sortant des compétences clé, par un partenaire industriel qui pourrait avoir des préoccupations à court terme.



Équipe 2 : Electronique organique (ORGATECH)

Nom du responsable : M. YVAN BONASSIEUX

Effectifs

Effectifs de l'équipe	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
N1 : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés	1	1
N2 : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés	4	3
N3 : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)	1	2
N4 : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
N5 : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.)	2	
N6 : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)		
TOTAL N1 à N6	8	6

Effectifs de l'équipe	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
Doctorants	5	
Thèses soutenues	7	
Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	1	
Nombre d'HDR soutenues	1	
Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées	3	3



• Appréciations détaillées

Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

Depuis 2008, l'équipe ORGATECH a publié 86 articles dans des revues internationales avec comité de lecture ainsi qu'un brevet. Les publications du groupe montrent une activité collaborative importante car de nombreux articles émanent de collaborations avec d'autres partenaires (issus des projets ANR et FP7). Les articles qui ont le plus d'impact sont ceux liés au cœur d'expertise de cette équipe : la modélisation physique (et compacte) des composants organiques, la conception de transistors et diodes organiques. C'est dans ces domaines que les articles sont les plus innovants et les plus cités. C'est également dans ce domaine que l'on peut aussi noter un fait marquant important sur le développement d'un nouvel outil de simulation SPICE des transistors organiques.

Dans le domaine de PV (photovoltaïque) organique, l'équipe ORGATECH pourrait se démarquer des autres laboratoires qui travaillent dans le même domaine en s'appuyant encore plus sur l'expertise et les travaux des autres équipes du laboratoire (NanoSil et/ou caractérisation optique). L'approche « hybride », sur les perovskites est à encourager car la physique de ces dispositifs est encore sujette à controverse et ORGATECH semble bien armée pour apporter de nouveaux éclaircissements. De plus, ORGATECH s'est associée à des équipes de chimistes pour la synthèse de nouveaux matériaux.

Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

L'équipe ORGATECH a attiré une personnalité internationalement reconnue dans le monde de l'électronique organique grâce à ses travaux pionniers sur les transistors organiques. Son arrivée a indiscutablement accéléré la notoriété de l'équipe. Il est à souligner l'accueil de 3 chercheurs CNRS depuis 2010 et d'un ingénieur de recherche pour l'instrumentation. Ceci témoigne de l'attractivité de cette équipe et contribuera, à son tour, à améliorer sa notoriété.

L'équipe ORGATECH est présente dans plusieurs comités scientifiques de différentes manifestations spécialisées (ICOE, JNPV, GDR), coordonne ou participe à des projets de recherche nationaux et internationaux (ANR, FP6 et FP7), a des collaborations industrielles (*e.g.* Polypore, Hutchinson, Riber et PSA). Tous ces indicateurs montrent clairement que l'équipe ORGATECH est bien implantée dans la communauté. Enfin, cette équipe est également très impliquée dans le partenariat école polytechnique Kyung Hee University de Seoul. On soulignera que plusieurs thèses sont ou ont été réalisées dans ce cadre avec des étudiants de très haut niveau.

Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

L'équipe ORGATECH a des collaborations avec le monde industriel au travers des différents projets ANR, FP6 et FP7 dans lesquels elle était partenaire. La mise en place d'un contrat de collaboration de longue durée (5 ans) avec des moyens associés avec PSA est particulièrement efficace. De même, il existe une relation étroite et pérenne entre le CEA et l'équipe ORGATECH grâce au détachement d'un ingénieur du CEA dans les locaux du LPICM.

Appréciation sur l'organisation et la vie de l'équipe

L'équipe ORGATECH est composée de chercheurs, d'enseignants chercheurs et d'ingénieurs de différents horizons. Les activités de cette équipe sont assez diverses et reposent sur de nombreuses collaborations, notamment avec des laboratoires de chimie organique (SCR, LCPO, CEISAM, etc). La ligne directrice de l'équipe peut sembler assez confuse par la diversité des actions menées. Par exemple, l'accueil de chercheurs chimistes organiciens au sein d'ORGATECH dilue le cœur d'expertise même s'il est évident que le développement de l'électronique organique ne peut se faire qu'en symbiose avec les chimistes pour le développement des nouveaux matériaux. L'intégration de ces deux chercheurs passe par de l'investissement pour la mise en place d'une plateforme de chimie (CHIMORGA). Une mutualisation de cet investissement avec les laboratoires de chimie de l'école polytechnique pourrait être envisagée.

Le site web du laboratoire devrait mieux décrire les activités de l'équipe ORGATECH, notamment pour les publications.



L'équipe a stoppé son activité sur les TFT Silicium μ -cristallin de façon à se concentrer sur l'électronique organique. Cette décision apporte de la clarté et renforce le potentiel de recherche sur l'axe de l'équipe. Un effort de cohérence, par exemple autour de la modélisation physique (et compacte) des composants organiques, de la conception de transistors et de diodes organiques (OPV et OLED) permettrait d'améliorer la visibilité d'ORGATECH.

Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

L'équipe ORGATECH est particulièrement bien impliquée dans l'enseignement au niveau de l'école polytechnique mais aussi de l'UPD, IOGS, etc.. Il faut souligner que bien qu'il n'y ait qu'un seul enseignant/chercheur, tous les membres de l'équipe sont impliqués dans les enseignements et dans le transfert des résultats de la recherche au niveau des enseignements. C'est une excellente stratégie, non seulement pour le devenir professionnel des étudiants mais aussi pour attirer les meilleurs d'entre eux en thèse. Il faut également souligner que le responsable d'équipe est le directeur du Master commun (École Polytechnique / Kyung Hee University de Seoul).

Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

L'équipe ORGATECH est assez récente et date de 2007. Elle a grandi au cours des dernières années par l'accueil de chercheurs et ingénieurs. La thématique historique sur les TFT en silicium μ cristallin a été abandonnée en 2012 pour recentrer l'activité de recherche sur l'électronique organique. Il est donc normal que le projet de recherche présenté par l'équipe s'engage sur la continuité de ce qui a été initié.

Le domaine du photovoltaïque organique est très compétitif sur le plan international et il est difficile d'y apporter une rupture technologique tant il y a de monde qui travaille sur ce sujet. Les tendances actuelles sont reprises dans le projet (polymères conjugués à faible bande interdite, cellules solaires hybrides perovskite). Une ouverture vers la production d'hydrogène par conversion solaire est également engagée. Il est certes important de ne pas abandonner ces recherches car les applications industrielles sont grandes, néanmoins, il semble difficile d'y apporter une rupture scientifique ou technologique.

La physique des semiconducteurs et des composants organiques est le cœur de l'expertise d'ORGATECH. La poursuite du travail engagé sur la modélisation des composants organiques, notamment des transistors, afin d'implémenter des modèles algébriques dans les outils de simulation permettra de faire progresser les connaissances. Cette modélisation est également un sujet propice à l'innovation et au transfert industriel. En effet, l'essor des circuits organiques passera par une définition précise des règles de conception. Pour cela, les outils de conception sont encore à mettre en place ainsi qu'il est nécessaire de stabiliser les technologies de fabrication des circuits. Un renforcement de la collaboration avec le CEA/LITEN (plateforme PICTIC) pourrait être bénéfique.

Les semiconducteurs organiques, dans certains cas, allient conduction électronique et conduction ionique. Cette double compétence n'est pas accessible avec les semiconducteurs minéraux. De fait, dans ce domaine, les semiconducteurs organiques offrent de nouvelles potentialités pour la conception de nouveaux capteurs (ou actionneurs) pour des applications dans le domaine la biologie. L'équipe est expérimentée et a un réseau de partenaires européens pouvant permettre des ruptures technologiques (ou conceptuelles) dans ce domaine.

Une partie du projet est dédiée à la synthèse de matériaux luminescents pour la « down-conversion » pour les cellules solaires silicium couches minces en partenariat avec l'équipe NanoSil. Les collaborations entre les équipes du LPICM sont à encourager et à développer. Dans ce cas précis, cette voie présente quelques risques pour une application industrielle car comme l'émission se fait sur les 4 Pi stéradians de nombreux photons seront perdus pour la cellule solaire.



Conclusion

- *Points forts et possibilités liées au contexte :*

Les points forts de l'équipe ORGATECH sont liés à la modélisation des semiconducteurs et composants organiques ainsi qu'à la réalisation des composants grâce aux outils de la plateforme technologique éponyme. L'équipe possède des membres reconnus dans le domaine et des ingénieurs compétents. Ce dernier point est un atout considérable pour le développement de nouveaux instruments, d'autant plus que le LPICM a un bureau d'étude qui permet de réaliser ces nouveaux instruments. L'équipe bénéficie également d'un environnement scientifique excellent et propice à l'émergence de nouvelles idées ou concepts. Les membres de l'équipe possèdent un réseau de collaborateurs importants et sont bien identifiés dans le paysage national et européen comme le démontrent les nombreux projets de recherches. L'équipe, à l'image du reste du laboratoire, est impliquée dans la recherche partenariale. ORGATECH participe activement au transfert des connaissances vers l'enseignement. Ce point est remarquable, d'autant plus que l'accueil des étudiants pour les travaux pratiques se fait sur les équipements de recherche. L'ensemble du personnel de l'équipe participe à ce transfert.

- *Points faibles et risques liés au contexte :*

L'équipe mise sur le photovoltaïque organique qui est un domaine dans lequel les ruptures ne sont pas faciles à identifier, et la fiabilité est encore un obstacle significatif pour l'application.

- *Recommandations :*

L'équipe a tout intérêt à se focaliser sur ses points forts de façon à se démarquer des autres laboratoires travaillant dans le domaine de l'électronique organique. Concernant la construction de la plateforme, il serait préférable d'améliorer la collaboration avec des laboratoires de chimie organique. Des interactions plus fortes avec les autres équipes du laboratoire pourraient également déboucher sur des approches originales, notamment en ce qui concerne la caractérisation des cellules solaires. Une analyse du positionnement d'ORGATECH par rapport aux autres laboratoires d'électronique organique pourrait aider à centrer les activités de l'équipe sur son cœur de compétences. Sa visibilité serait grandement améliorée.



Équipe 3 : Nanomatériaux et Applications Electroniques (NanoMaDe)

Nom du responsable : M. Costel Sorin COJOCARU

Effectifs

Effectifs de l'équipe	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
N1 : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés		
N2 : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés	3 (2.5)	4 (3.5)
N3 : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)	2	2
N4 : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
N5 : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.)	2 (1.5)	1 (0.5)
N6 : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)		
TOTAL N1 à N6	7 (6)	7 (6)

Effectifs de l'équipe	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
Doctorants	8	
Thèses soutenues	10	
Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	3	
Nombre d'HDR soutenues	1	
Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées	3	2

• Appréciations détaillées

Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

L'équipe NanoMaDe conduit des travaux de recherche technologique visant à maîtriser les mécanismes de croissance et les procédés d'intégration de matériaux et nano-objets à faible dimensionnalité (nanofils, nanotubes de carbone, graphène). La principale caractéristique de cette équipe consiste à avoir réussi à disséminer ces nano-objets vers divers secteurs applicatifs à fort potentiel socio-économique tels que l'électronique, l'énergie et l'environnement.



L'approche de l'équipe consiste à étudier les mécanismes de croissance par dépôt en phase chimique (CVD) dans des réacteurs de laboratoire, construits en interne, permettant d'explorer plusieurs configurations (plasma DC, filament chaud,) et de faire varier, d'une façon indépendante, tous les paramètres expérimentaux (température, nature et débit des gaz réactifs, oxydants et inertes, pression, puissance plasma, etc.). De plus, des outils de diagnostics plasma et de caractérisation *in-situ* sont implantés dans des réacteurs reconfigurables permettant aux chercheurs de l'équipe de suivre à l'échelle atomique les mécanismes de croissance et de mieux cerner leur impact sur les propriétés morphologiques et fonctionnelles des matériaux et nano-objets étudiés.

Cette infrastructure technologique complète, associée à une politique partenariale très dynamique, a permis à l'équipe, depuis sa création en 2005, d'être à l'origine de plusieurs avancées technologiques à fort impact scientifique. L'ensemble de ces travaux donne régulièrement lieu à des présentations aux conférences internationales de bon niveau aussi bien pour celles dédiées aux aspects matériaux (MRS, ECS, SPIE) qu'aux applications (International Display Workshops, IEEE Vacuum Electronics Conference IVEC ; NICOM : Nanotechnology in Construction, ..). Les revues choisies par les membres de l'équipe pour diffuser leurs résultats sont dans l'ensemble de très bon niveau et à fort impact (Nanotechnology, ACS Nano, Advanced Materials, Carbon, APL, ..). Certaines publications sont considérées comme une référence dans leur domaine et sont citées régulièrement. Le nombre de brevets (8) déposés pendant la période est honorable et témoigne de la réussite de la politique partenariale de l'équipe.

Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Au niveau européen, l'équipe NanoMaDe a acquis une bonne notoriété dans le domaine « des composants électroniques intégrant des nano-objets » en étant leader d'un STREP-FP6 (CANDICE) et en participant à un autre STREP-FP7 (OPHTHER). Des membres de l'équipe participent à l'organisation de conférences internationales SPIE, ITC, HWCVD

Sur le plan national, le dynamisme de l'Equipe et sa forte collaboration industrielle (Equipes de Recherche Communes avec Thales et l'IFSTTAR, Chaire Samsung, Chaire PSA) ont considérablement facilité sa participation aux programmes structurants de la communauté nationale et locale. L'équipe a en effet été lauréate d'un Equipex (Fenix), a participé activement à un autre (SenseCity) ainsi qu'au Labex Nanoscaly. A cet égard, la non-participation de cette équipe au GDR (et GDRI) Nanotubes et Graphène est regrettable. Il serait utile de rejoindre ce réseau pour une meilleure cohérence et une plus grande concertation avec les autres acteurs nationaux et internationaux du domaine

Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

Le partenariat industriel « historique » avec Thales R&T est un socle solide pour la valorisation des développements technologiques de l'équipe. Ce partenariat est équilibré car il se base sur des publications et inventions communes et permet à l'équipe d'accéder à une infrastructure technologique à l'état de l'art au sein de l'entreprise. Les thématiques de recherche communes traitées dans le cadre de l'Equipe de Recherche Commune NanoCarb ont donné lieu à d'importantes valorisations dans les domaines de l'électronique et de l'optoélectronique (cathode avec émetteurs à effet de champs à base de nanotubes de carbone, source portative de RX pour la tomographie, modulation optique de source RX, etc.). L'avènement du projet européen phare CE-Graphene-Flagship, auquel participe Thales R&T, amorce, au sein de l'ERC Nanocarb, de nouvelles perspectives de recherche sur la synthèse et l'intégration du graphène.

Le partenariat avec Renault SA a constitué une formidable opportunité pour l'équipe et a permis de valoriser, à leur juste valeur, ses compétences et savoir-faire dans le domaine de l'élaboration de nanofils silicium et nanotubes de carbone. Les publications communes et le brevet en co-invention correspondants témoignent de l'équilibre de cette collaboration.

Enfin, les travaux dans le domaine des nano capteurs sont très prometteurs. Les performances des premiers démonstrateurs (sensibilité, sélectivité, rapidité) de nanocapteurs à base de nanotubes de carbone semblent avoir été un tremplin pour l'élargissement du partenariat initial avec IFSTTAR vers d'autres acteurs industriels et institutionnels (ICMMO, CSTB, CEA, Thales). La participation à l'Equipex SenseCity est sûrement très utile et permettra à l'équipe d'asseoir définitivement ses compétences dans ce domaine.



Appréciation sur l'organisation et la vie de l'équipe

L'équipe NanoMaDe ne compte que 3 chercheurs ETP ce qui confirme, au regard de son activité scientifique, l'extrême dynamisme de ses membres ainsi que leur capacité à faire évoluer leurs travaux de recherche. La contribution des personnels non permanents à la bonne marche de l'équipe est indéniable et se concrétise par une excellente participation aux publications de l'équipe dans les périodiques scientifiques mais aussi dans des chapitres de livres. Les activités de l'équipe reposent en grande partie sur l'excellence de sa plateforme technologique. Cette dernière s'est considérablement enrichie et diversifiée depuis 2010. Si l'acquisition d'une nouvelle tranche de l'équipex Tempos est garantie grâce aux fonds publics déjà alloués, l'équipe devra veiller à garantir le bon fonctionnement de l'ensemble de ces moyens technologiques en termes de ressources contractuelles mais surtout en support technique pérenne. Le recrutement récent d'une ingénieure de recherche devrait répondre à ce dernier besoin.

Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

La formation par la recherche traduit le dynamisme de l'équipe qui compte trois personnes habilitées à diriger des recherches. Elle se déroule naturellement en lien avec l'École Doctorale de l'École Polytechnique et se caractérise par une bonne diversité des financements (CIFRE, allocations doctorales, ressources propres Ecole X, EGIDE). Régulièrement, l'équipe accueille de très bons doctorants étrangers dont les travaux de thèses semblent être le pivot de collaboration à l'international (universités Coréennes notamment). Enfin, l'insertion dans la vie professionnelle des docteurs formés par l'équipe semble se faire majoritairement dans le monde industriel (en France et à l'Étranger) ce qui est en parfait accord avec l'esprit de recherche collaborative de l'équipe. L'implication dans les autres cycles de formation reste relativement modeste mais se justifie amplement par le nombre de permanents au sein de l'équipe.

Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Le projet de recherche consiste, d'un côté, à poursuivre les études amont sur la croissance de nano-fils de semiconducteurs, nanotubes de carbone et du graphène et, de l'autre côté, à les intégrer dans divers démonstrateurs issus des secteurs applicatifs phares de l'équipe tels que les batteries, les sources RX ou les nano-capteurs.

L'arrivée en 2016 de la deuxième tranche de Fenix permettra de renforcer les techniques de suivi et de diagnostic de la croissance *in situ*. Il sera alors possible aux membres de l'équipe de mieux analyser, à l'échelle atomique, le premier stade de la croissance de ces nano-objets et matériaux et de proposer, par conséquent, leur formation sur des substrats isolants comme le quartz ou le saphir.

Les applications visées s'inscrivent également dans la continuité de celles traitées pendant la période examinée. Si les objectifs visés dans le domaine des batteries sont clairs et conformes aux grandes orientations du domaine (qualification de l'apport des nanotechnologies en termes de performances dynamiques et en fiabilité) ceux relatifs au développement de capteurs environnementaux restent relativement vagues et généralistes. Les partenariats proposés sont pratiquement les mêmes (Thales, Renault, IFSTTAR) et les cadres collaboratifs proposés sont bien éprouvés et crédibles (Equipes de Recherche Communes, Labex, Equipex) ce qui confère au projet de l'équipe une certaine continuité.

Conclusion

▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

Les points forts résident essentiellement dans l'adéquation entre l'infrastructure technologique et les objectifs scientifiques. Les moyens technologiques d'élaboration et de caractérisation sont parfaitement adaptés à la conduite de ce type d'études « amont ». La richesse de l'écosystème local Plateau de Saclay est un autre atout de taille pour la bonne marche des activités scientifiques de cette Equipe. L'équipe envisage d'ailleurs de tirer profit de ce contexte pour lancer une incubation de start-up.



Le projet de recherche s'inscrit dans la poursuite des activités actuelles. Grâce aux compétences acquises et aux moyens technologiques avancés (Fenix, Nanomax), l'équipe pourra renforcer son expertise dans les domaines suivants :

- études fondamentales sur les mécanismes de croissance de nanomatériaux (nanotubes de carbone graphène, nanofils) et les procédés de mise en œuvre pour leur intégration dans des démonstrateurs ;
- développement et étude des nouveaux dispositifs et preuves de concepts basés sur ces nanomatériaux.

▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

Deux craintes subsistent quant à la faisabilité de ce projet, et devraient faire l'objet de recherche de solutions. La première est relative au financement propre de ces recherches, la seconde, plus sérieuse, est relative aux moyens humains de l'équipe notamment en termes de personnels permanents CNRS ou École Polytechnique.

▪ *Recommandations :*

Afin d'assurer un financement propre de ses recherches, l'équipe devra renforcer sa participation aux programmes européens afin de continuer à avoir de l'avance en recherche amont. Le programme phare CE-flagship Graphene est une bonne opportunité à saisir.

Une attention particulière à la gestion des ressources humaines notamment en termes de personnels permanents CNRS ou École Polytechnique. Il est mentionné que deux départs à la retraite devront avoir lieu pendant la période 2014-2020. Il faudra alors pallier ce problème par un recrutement judicieux visant à pérenniser les compétences propres de l'équipe. En l'absence de tels recrutements, l'équipe devra réduire le nombre de sujets traités et privilégier l'excellence de son cœur de compétence qui est indéniablement la synthèse et la caractérisation de nano-matériaux et de nano-objets.



Équipe 4 : Caractérisations optiques

Nom du responsable : M. Antonello DEMARTINO

Effectifs

Effectifs de l'équipe	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
N1 : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés	2	2
N2 : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés	2	3
N3 : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)	2	4
N4 : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
N5 : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.)	3	1
N6 : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)		
TOTAL N1 à N6	9	10

Effectifs de l'équipe	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
Doctorants	4	
Thèses soutenues	6	
Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	2	
Nombre d'HDR soutenues	1	
Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées	3	3

Appréciations détaillées

Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

L'interprétation des images obtenues par polarimétrie de Mueller nécessite des modèles, issus d'outils de simulation rigoureux ou d'algorithmes de réduction de données. L'équipe se distingue par ses travaux sur ce dernier aspect. Les applications visées sont d'ordre médical avec la détection de cellules cancéreuses ou métrologiques en lien avec l'industrie des semi-conducteurs.



L'équipe est impliquée dans différents projets concernant la métrologie des réseaux de diffraction. Dans ce domaine, la scattérométrie par polarimétrie de Muller est tout à fait originale et le LPICM est pionnier sur cet aspect.

L'équipe "caractérisations optiques" a publié 76 articles dans des revues à comité de lecture parmi lesquelles on compte Optics Express et Optics Letters dont le facteur d'impact est supérieur à 3,5. Notons que certains papiers, relatifs au cœur de l'expertise de l'équipe ont été cités au moins 10 fois par an ce qui est significatif au regard de la communauté. On compte également 19 actes de conférence dont 5 invités, 2 brevets et 2 chapitres d'ouvrage.

Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

L'équipe a participé ou participe à 10 projets ANR, à 1 projet européen et 1 projet INCa. Pour la moitié d'entre eux elle est coordinatrice du projet. Elle est sollicitée par de nombreuses entreprises pour son expertise en instrumentation Raman et notamment par le leader mondial Jobin-Yvon. Parmi les contractants industriels, on trouve ASML leader mondial en nanolithographie pour la microélectronique.

Dans le domaine du NanoRaman, durant les cinq dernières années, des améliorations instrumentales ont vu le jour comme le contrôle de la polarisation des faisceaux incidents et diffractés ainsi que l'optimisation et la maîtrise de la fabrication des pointes. En ajoutant un mode à force de cisaillement (SF), le groupe est au niveau de l'état de l'art mondial et a d'ailleurs déposé un brevet sur l'utilisation conjointe des modes SF et STM.

L'équipe a accueilli pendant six mois un professeur pionnier et de renommée internationale de l'AFM. Sa venue a ouvert des perspectives novatrices et extrêmement prometteuses pour la TERS. Les premières applications concernent aussi bien des structures à base de Si, de Ge ou de GaAs pour lesquelles il a été possible de mesurer le tenseur des contraintes à l'échelle de quelques dizaines de nanomètres. L'expertise du groupe est bien entendu mise au service des autres équipes du laboratoire.

Un autre professeur a également été accueilli pendant six mois autour du thème de l'imagerie polarimétrique pour le diagnostic biomédical.

Le brevet sur le colposcope polarimétrique a été récompensé par le prix de l'innovation de l'École Polytechnique.

Appréciation sur l'interaction avec l'environnement social, économique et culturel

La promotion de l'utilisation de la polarimétrie de Mueller en tant qu'outil de métrologie et de caractérisation est à mettre au crédit de l'équipe qui a été pionnière dans les travaux théoriques indispensables au développement de cette technique. En parallèle, l'équipe possède l'expertise pour concevoir et développer les instruments associés. C'est cette double compétence qui est recherchée par les entreprises leader comme Jobin-Yvon et qui est également précieuse pour les autres équipes du laboratoire.

Le diagnostic médical est l'une des applications récentes de l'imagerie polarimétrique. L'interprétation d'images polarimétriques de tissus, notamment cancéreux, reste un sujet à défricher. Pour cela, la collaboration d'acteurs de terrain du monde médical est indispensable. Une thèse de science a été soutenue par un médecin. L'équipe a su s'attirer le soutien de deux chefs de service de l'Institut Mutualiste Montsouris dans lequel un polarimètre pour l'imagerie a été mis en service. Un projet sur cette thématique, financé par l'INCa et dirigé par l'équipe, a démarré en 2012. Un autre polarimètre intégrant des fibres optiques fait l'objet d'un projet ANR coordonné par XLIM avec ce même institut comme partenaire.

Un autre polarimètre va être intégré dans une plateforme de caractérisation *in-situ* au Laboratoire des technologies de la Microélectronique (LTM) à Grenoble, dans le cadre de l'Equipex IMPACT.

Appréciation sur l'organisation et la vie de l'équipe

Il est difficile d'apprécier le *modus operandi* de l'interaction de l'équipe avec les autres parties du laboratoire. Par contre la visite a permis de constater que cette interaction a bien lieu et que l'ensemble du LPICM, de même que d'autres laboratoires du site, bénéficie de l'expertise en caractérisation développée dans l'équipe.



Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

7 thèses ont été soutenues et 4 sont en cours. En sus de 2 enseignants attachés au département physique de l'X, 3 autres chercheurs participent à des enseignements de Master à l'X ou dans des établissements extérieurs. Enfin, un membre a soutenu son HDR ce qui augmente le potentiel d'encadrement de l'équipe.

Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Certaines activités de l'équipe comme la polarimétrie de Mueller arrivent à maturité. Il s'agit maintenant de les faire vivre à travers des applications afin de tester et valoriser les acquis théoriques. La piste des applications biomédicales est privilégiée en cohérence avec la volonté de l'équipe de mettre le diagnostic biomédical au centre de son activité, ce qui paraît un choix pertinent au vu des résultats déjà obtenus et des partenariats de premier plan mis en place. De même, la scattérométrie polarimétrique des objets périodiques évoluera vers des activités plus transversales au sein du laboratoire.

Les activités NanoRaman s'appuieront sur l'élan impulsé par l'arrivée d'un nouveau professeur pour caractériser les contraintes au niveau nanométrique pour des structures mais aussi pour des systèmes.

La stratégie pour le futur repose sur une démarche qui consiste d'abord à consolider les acquis théoriques avant d'aller vers des applications ciblées. La spécificité du groupe est ainsi préservée et assure sa réactivité vis à vis d'opportunités de collaboration.

Conclusion

▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

L'équipe a su mettre en œuvre une stratégie scientifique sur des axes prometteurs. Elle bénéficie d'un réseau de collaborations de premier plan. Elle possède de solides compétences théoriques mises à profit dans le développement d'instruments de mesure novateurs maîtrisant ainsi toute la chaîne de valeur de cette thématique.

▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

L'arrivée dans l'équipe d'un CR (octobre 2010) et d'un IR X (janvier 2008) ne suffit pas à compenser un déséquilibre au niveau de la pyramide des âges qui, à relativement brève échéance, va la priver de ses principaux cadres.

▪ *Recommandations :*

Il est donc important de veiller à consolider et à valoriser encore davantage le savoir faire de premier plan dont dispose aujourd'hui l'équipe. Elle pourra ainsi surmonter le problème récurrent des moyens humains et avoir un rôle moteur pour fédérer autour d'elle d'autres acteurs.



5 • Déroulement de la visite

Dates de la visite

Début : 9 Janvier 2014 à 11H00

Fin : 10 Janvier 2014 à 17H30

Lieu(x) de la visite

Institution : LPICM, Ecole Polytechnique,

Adresse : Route de Saclay 91128 Palaiseau cedex

Locaux spécifiques visités :

Ailes 0, 2, 4 ; bâtiments 404, 406, 408 ; 6 plateformes technologiques : Couches Minces, NanoMAX, Orgatech, Nanomatériaux, Caractérisation Optique, PVSIXT

Déroulement ou programme de visite

9 janvier 2014

11h30	Réunion préparatoire du comité d'experts (huis-clos, salle de réunion Bat 406)
12h30	Déjeuner comité d'experts avec équipe direction LPICM
13h30	En Amphi Becquerel : Briefing du président du comité d'experts (Public)
13h45	Présentation du laboratoire et de l'activité 2008-2013 par le directeur M. Pere ROCA I CABARROCAS (public)
14h15	Projet par le directeur M. Pere ROCA I CABARROCAS (public)
14h30	Questions au directeur (public)
14h45	Exposés faits marquants (public) présentation et questions
14h45	Équipe Nanomatériaux Silicium (M. Erik JOHNSON)
15h30	Équipe ORGATECH (M. Yvan BONNASSIEUX)
16h15	Pause (salle de réunions bâtiment 408)
16h30	Visite des activités des deux groupes - Public
18h	Réunion bilan du comité d'experts (huis-clos, salle de réunion Bat 406)

10 janvier 2014

8h30	Accueil café Amphi Becquerel
9h	Exposés faits marquants (public) présentation et questions
9h	Équipe NanoMaDe (M. Costel-Sorin COJOCARU)
9h45	Équipe Caractérisations Optiques (M. Antonello DE MARTINO)
10h30	Visite des activités des deux groupes - Public
12h00	Rencontre avec les tutelles (huis clos, salle de réunion Bat 408)



12h30	Rencontre enseignants-chercheurs et chercheurs (huis clos, sans chef d'équipes, salle de réunion Bat 408)
13h00	Déjeuner. Buffet avec tout le personnel du laboratoire
14h00	Rencontre ITA/BIATOSS, (huis clos, salle de réunion Bat 408)
14h30	Rencontre doctorants (huis clos, salle de réunion Bat 408)
15h00	Rencontre avec le directeur de l'ED (huis clos, salle de réunion Bat 408)
15h20	Rencontre avec le directeur et les responsables d'équipes (huis clos, salle de réunion Bat 408)
15h40	Pause
16h00	Synthèse du comité d'experts (huis-clos, salle de réunion Bat 408)
17h30	Fin de la visite



6 • Observations générales des tutelles



Patrick Le Quéré
Directeur adjoint de l'Enseignement et de la Recherche

Madame Nathalie Dospital
Déléguée Administrative
Section des unités
AERES
20 rue Vivienne
75002 PARIS

Objet : Evaluation AERES du LPICM
Référence : DAER /LL/14 – n° 67
PJ : Réponse au rapport d'évaluation du LPICM - S2PUR150008588 - 006497

Palaiseau, le 18 mars 2014.

Chère Madame,

Le LPICM (UMR 7647) n'a pas de remarque particulière à formuler sur le rapport AERES.

En tant que co-tutelle du LPICM, nous n'avons pas de commentaire particulier à faire, autre que vous faire savoir que nous avons été très sensibles à la qualité du rapport, et vous prions de remercier en notre nom l'ensemble des membres du comité et son président pour le temps qu'ils ont consacré à cette évaluation.

En vous souhaitant bonne réception de la présente, je vous prie de croire, Chère Madame, à l'assurance de mes meilleures salutations.

Patrick Le Quéré
*Directeur adjoint de l'Enseignement et de la
Recherche*