



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

Section des Unités de recherche

Rapport de l'AERES sur
l'unité :

Laboratoire d'Étude des Microstructures

LEM

sous tutelle des
établissements et organismes :

CNRS

ONERA



Février 2012



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

Section des Unités de recherche

Le Président de l'AERES

Didier Houssin

Section des Unités
de recherche

Le Directeur

Pierre Glaudes



Unité

Nom de l'unité : Laboratoire d'Étude des Microstructures

Acronyme de l'unité : LEM

Label demandé : UMR

N° actuel : UMR 104

Nom du directeur
(2009-2012) : M. Alphonse FINEL

Nom du porteur de projet
(2013-2017) :

Membres du comité d'experts

Président : M. Didier BLAVETTE, GPM, Rouen

Experts : M. Philippe GOUDEAU, Pprime, Poitiers

M. Joseph MORILLO, CEMES, Toulouse

M. Gilles PATRIARCHE, LPN, Marcoussis

M. Philippe POULIN, CRPP, Bordeaux

M. Michel RAPPAZ, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne

Représentants présents lors de la visite

Déléguée scientifique représentant de l'AERES :

M^{me} Anne RENAULT

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

M. Giancarlo FAINI, INP, CNRS

M. Denis MAUGARS, Onera



Rapport

1 • Introduction

Date et déroulement de la visite :

Le comité tient à remercier le directeur du laboratoire pour les excellentes conditions dans lesquelles la visite du comité au LEM s'est déroulée (1 et 2 février 2012).

La visite a commencé par la présentation générale du laboratoire par son directeur, suivie de 5 exposés scientifiques montrant des résultats marquants récents. Une séance de posters est venue en complément. Le comité a ensuite pu visiter des installations et équipements du LEM. La première journée s'est terminée par un entretien à huis clos entre le comité et la direction du LEM.

La deuxième journée a été dédiée à la présentation du projet du LEM par son directeur, aux rencontres avec les doctorants, post-doctorants, personnels ITA et tutelles (CNRS, ONERA). Le comité a eu ensuite un second entretien avec la direction du LEM pour éclaircir les tous derniers points discutés avec les tutelles.

Les nombreuses et fructueuses rencontres avec les personnels (chercheurs, doctorants, post-docs, ITA, tutelles) ont permis une analyse détaillée et affinée de la situation et des perspectives. Le comité a en particulier apprécié la disponibilité de M. Le Président de l'ONERA, du DAS CNRS de l'INP et des directeurs scientifiques et techniques et de branche de l'ONERA avec qui les membres du comité ont pu échanger très librement sur la stratégie « LEM » de l'établissement au regard de celle du CNRS et avancer vers une perception commune plus claire du futur du LEM.

Historique et localisation géographique de l'unité et description synthétique de son domaine et de ses activités :

Le LEM est une unité mixte de recherche CNRS-ONERA créée en 1988. Les recherches qui y sont menées ont pour but de comprendre les microstructures se développant dans les matériaux et leur influence sur leurs comportements physiques. Il s'agit d'études théoriques et expérimentales sur les nanotubes, les structures atomiques et les propriétés de transport, les microstructures de changement de phase et les propriétés plastiques. Ces activités sont menées en relation étroite avec les Départements de l'ONERA sur des sujets répondant à des préoccupations communes concernant la compréhension et l'optimisation de matériaux destinés à l'aéronautique et à l'espace.

Le LEM est actuellement localisé sur le site ONERA de Châtillon. Un déménagement est prévu à moyen terme sur le site de Palaiseau, situé sur le plateau de Saclay.

Equipe de Direction :

M. Alphonse FINEL, Directeur.

M. Denis GRATIAS, Directeur adjoint.



Effectifs de l'unité :

Effectifs	Nombre au 30/06/2011	Nombre au 01/01/2013	2013-2017 Nombre de produisants du projet **
N1 : Enseignants-chercheurs	1	1	0
N2 : Chercheurs des EPST ou EPIC	12	11	10
N3 : Autres enseignants-chercheurs et chercheurs	3	3	3
N4 : Ingénieurs, techniciens et personnels administratifs titulaires*	4	4	
N5 : Ingénieurs, techniciens et personnels administratifs non titulaires*	0		
N6 : Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	13		
N7 : Doctorants	9		
N8 : Thèses soutenues	17		
N9 : Nombre d'HDR soutenues	3		
N10 : Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées	10	10	
TOTAL N1 à N7	42	19	13

* Si différent, indiquer entre parenthèses les ETP correspondants.

** Nombre de producteurs de la période [1^{er} janvier 2007-30 juin 2011] et qui seront présents en 2013-2017.

Définition et téléchargement des critères :

<http://www.aeres-evaluation.fr/Evaluation/Evaluation-des-unites-de-recherche/Principes-d-evaluation>.



2 • Appréciation sur l'unité

Le LEM, unité mixte ONERA-CNRS, jouit d'une grande visibilité internationale sur un spectre large allant des nanotubes de carbones et nitrures de bore jusqu'aux alliages métalliques incluant les quasicristaux en passant par les nanoparticules (CoPt). Ses activités couvrent à peu près toutes les échelles de la modélisation, allant des calculs ab-initio aux calculs par éléments finis (MEF), en passant par la dynamique moléculaire (DM), la dynamique des dislocations (DD), la simulation Monte-Carlo et la méthode de champ de phase .

Points forts :

La modélisation en lien avec l'expérience (microscopie électronique, diffraction des RX...) depuis l'atome jusqu'au macroscopique en passant par l'échelle mésoscopique (champ de phase et dynamique des dislocations) font pour une grande part l'originalité et la renommée du laboratoire. Ces recherches touchent à la fois au comportement plastique des matériaux, à la genèse des microstructures et leur évolution microstructurale (transformations de phase) le cas échéant sous contrainte (fluage, systèmes forcés...). La visibilité internationale du laboratoire tient aussi à ses travaux tout à fait remarquables sur la synthèse et la modélisation de la germination/croissance des nanotubes ainsi que l'étude expérimentale et théorique de leurs propriétés optiques et électroniques. Le LEM a tissé de nombreuses collaborations fructueuses avec les meilleurs laboratoires français ou étrangers dans ces domaines. Le LEM est une ressource amont jugée essentielle par l'ONERA

Points à améliorer et risques :

Le départ récent de spécialistes en microscopie électronique fragilise cette activité et menace l'équilibre expérience-modélisation. Par ailleurs, la pyramide des âges du LEM pose très clairement la question des recrutements sur les 5 ans à venir sur les domaines qui font la renommée actuelle du laboratoire.

Opportunités :

Le déménagement de l'ONERA sur le plateau de Saclay est une opportunité pour resserrer les liens avec les laboratoires voisins sur des problématiques communes et pour mettre en commun les compétences et les équipements (e.g. projet de microscopie électronique basse tension).

Recommandations :

Face aux ambitions affichées par le LEM et la diversité des projets de grande qualité et enjeux, une plus grande hiérarchisation des priorités devrait être faite en regard des forces présentes. Le recrutement de modélisateurs sur les domaines d'excellence du LEM, actuellement en sous-effectif, est à cet égard essentiel. Toutefois, celui d'un très bon microscopiste devrait être également considéré pour renforcer la synergie expérience-modélisation. L'effort du LEM pour accroître les interactions entre chercheurs doit être poursuivi.



3 • Appréciations détaillées

Appréciation sur la qualité scientifique et la production :

Le LEM est un laboratoire mixte CNRS-ONERA de taille relativement modeste (12 chercheurs, 4 ITA) dont l'activité jouit d'une grande visibilité internationale et cela sur un spectre large allant des nanotubes de carbones et nitrures de bore jusqu'aux alliages intermétalliques complexes (phases MAX, quasicristaux) en passant par les nanoalliages. Le parc instrumental de caractérisation est composé essentiellement de deux microscopes électroniques à transmission dont l'un de dernière génération (ZEISS Libra 200), de deux diffractomètres de rayons X équipés d'un four et d'un montage de photo-luminescence UV capable de travailler à basse température (5 K).

Ses activités couvrent presque toutes les échelles de la modélisation, depuis l'ab-initio DFT aux calculs par éléments finis (MEF), en passant par la dynamique moléculaire (DM), la dynamique des dislocations (DD), la simulation Monte-Carlo et la méthode de champ de phase. Une des grandes qualités du LEM est sa capacité à aborder ces sujets par une triple approche : expérimentale, théorique par des études systématiques sur la base de modèles génériques judicieusement définis, et numérique par des simulations et modélisations réalistes.

Le laboratoire jouit d'une grande renommée dans différents domaines : synthèse et mécanismes de germination-croissance des nanotubes, dynamique des dislocations, modélisation des microstructures et de leur dynamique par champ de phase, synthèse - observation expérimentale et modélisation des nanoparticules CoPt ou encore cristallographie des quasicristaux.

Le laboratoire a été pionnier dans l'étude des nanotubes notamment des nitrures de bore (BN), de leur structure électronique et propriétés de luminescence dans l'UV (Nature Matter (2010)). Le LEM a ainsi développé des réacteurs de synthèse de nanotubes mono-parois. L'utilisation d'un laser de puissance a permis l'obtention de nanotubes de carbone et de nitrure de bore. Les recherches menées reposent sur des expériences tout à fait originales (analyses in-situ dans des réacteurs de croissance, microscopie électronique haute résolution) en lien fort avec la communauté. Le laboratoire a su ainsi tisser de nombreuses collaborations fructueuses (e.g. STM) venant en complément des compétences du LEM (simulations, EELS...).

Ses travaux en collaboration étroite avec le MPQ sur les nanoparticules magnétiques CoPt aux applications potentielles pour l'enregistrement magnétique haute densité sont remarquables : synthèse, observation en microscopie électronique et modélisation (modèles empiriques de type liaison forte au second moment ajustés sur des calculs ab initio DFT). Une approche multiple qui a montré sa force et sa pertinence pour préciser l'influence de la synthèse, de la cinétique et de la taille sur la stabilité thermodynamique de ces nanoalliages (articles dans Nature Mat. (2009) et PRL (2010)). Leur étude ab initio DFT de l'alliage CoPt massif a mis en évidence le rôle majeur du magnétisme sur la thermodynamique de l'alliage et sa nécessaire prise en compte dans les modélisations. Des développements sont en cours dans ce sens dans une approche de structure électronique de type liaison forte qui sera également utile pour les développements envisagés dans la synthèse des tubes de carbone sur nanoparticules de fer.

Les chercheurs du LEM jouissent également d'une bonne reconnaissance internationale dans le domaine des phases MAX (e.g. Ti_2AlX_m $X=C$ ou N). Citons par exemple les développements théoriques récents sur les interactions phonon-phonon (Phys. Rev. B (2010)) au-delà de l'approximation statique quasi-harmonique afin de calculer les temps de vie des phonons indispensables à l'étude du pouvoir thermoélectrique des phases MAX qui intéressent l'ONERA.. Dans le même domaine, un effort important a été fait sur la modélisation des spectres de perte d'énergie observés en TEM-EELS (nouveau microscope ZEISS en opération depuis 2009) afin de valider les structures électroniques calculées en ab-initio DFT (niveaux d'énergie des liaisons atomiques) ou de calculer les constantes diélectriques des matériaux à partir du signal EELS (faibles pertes d'énergie).

Mentionnons les recherches de premier plan du laboratoire sur les quasi-cristaux et approximants, en particulier dans l'étude théorique des métadislocations en lien avec le comportement plastique en collaboration avec le CEMES. Il est maintenant établi que le mouvement de ces métadislocations procède par montée et non par glissement.

Le LEM a également une identité forte au niveau international pour ses recherches fondamentales en plasticité (dynamique des dislocations pour l'étude du durcissement structural de monocristaux cfc, Science (2008)) et sur les transformations de phase (approches par champ de phase de la précipitation et influence de la plasticité). Le laboratoire mène ainsi des recherches multi-échelles sur la plasticité très remarquées incluant des approches par dynamique des dislocations et champ de phase. Les problématiques de plasticité confinée occupent aussi une place



importante (influence de la taille des grains et des joints de grain dans les polycristaux, mécanismes de relaxation élasto-plastique dans les couches d'hétéro-structures de semi-conducteurs). Mentionnons le couplage très fructueux avec les expériences de micro-diffraction Laue sur les grands instruments.

Le laboratoire fut ainsi l'un des premiers à intégrer déformations et contraintes dans le formalisme de champ de phase (CP) des transformations de phases, Mentionnons à ce titre les travaux remarquables sur l'influence d'une contrainte sur la coalescence des précipités dans les superalliages (mise en radeaux), matériaux clé dans les turbomachines au cœur des problématiques ONERA. L'équipe a démontré par changement d'échelle le passage atomique-mésoscopique (Phys. Rev. Lett. (2008)). Une approche CP reposant sur une description non-linéaire du champ de déplacement-déformation a permis récemment d'apporter un éclairage original sur les transformations displacives (alliages martensitiques à mémoire de forme). L'originalité des recherches dans ce domaine portant sur l'influence des effets élastiques sur la thermodynamique des systèmes biphasés (élargissement de la lacune de miscibilité) et la microstructure (e.g. MgNd) mériterait d'en publier davantage les résultats.

L'analyse de la bibliographie confirme l'excellence du laboratoire. Le LEM publie dans tous ses domaines de prédilection dans les meilleures revues (Science, Nature Mat., Phys. Rev.Lett., Phys. Rev B). Tous les indicateurs (147 RICL, 96 communications orales, 121 conférences invitées) incluant des prix scientifiques (médaille Saint-claire Deville, Prix Lecoq de l'académie des sciences, grande médaille SF2M) et son implication dans trois LABEX et un EQUIPEX (smartphène) montrent indiscutablement que le LEM compte parmi les meilleurs laboratoires à l'échelle internationale dans ses domaines d'excellence.

Appréciation sur l'intégration de l'unité dans son environnement :

Le LEM est reconnu pour son apport amont sur de nombreuses problématiques intéressant l'aéronautique et l'ONERA. Citons les superalliages (fluage orienté), les phases MAX, les intermétalliques, les thermoélectriques et brasures ou encore l'application des nanotubes pour la détection de gaz. Le laboratoire a tissé de très nombreuses collaborations tant nationales (ANR, GDR) qu'internationales sur des sujets dont les défis et enjeux sont importants pour les applications. Les chercheurs du LEM sont impliqués fortement dans la direction de nombreux GDR ou écoles. On compte 24 contrats nationaux dont 12 ANR et 5 contrats européens.

Bien que peu impliqué dans des contrats industriels compte-tenu de la politique de l'ONERA en la matière à l'égard du LEM, le laboratoire mène des recherches fondamentales en lien fort avec l'aval car ses problématiques sont au cœur des matériaux d'usage et du lien microstructure-propriétés. Citons les nanotubes pour la nano-électronique (approche bottom-up), les nanoparticules pour l'enregistrement magnétique, les alliages métalliques pour des applications structurales. Le LEM contribue également à la valorisation de ses recherches via la diffusion du logiciel libre MicroMegs de Dynamique des Dislocations mis au point par l'équipe plasticité.

Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité de l'unité de recherche :

Le LEM est composé de nombreuses personnalités très reconnues dans leur domaine sur la scène internationale. Le nombre important d'invitations dans les congrès (121 pour environ 12 chercheurs) traduit cela parfaitement. Le laboratoire a été impliqué dans l'organisation de 22 colloques ou symposia de congrès nationaux ou internationaux, de 8 GDR et de 4 écoles. Compte-tenu de sa taille, c'est tout à fait remarquable.

Le LEM est non seulement reconnu pour ses travaux de modélisation de très haut niveau mais aussi pour son expertise expérimentale, en particulier en microscopie électronique. Il a également un rayonnement national et international par ses collaborations avec divers groupes de recherche et son implication dans de nombreux groupements de recherche (GDR, Mécamat, projets ANR, etc).

Le LEM bénéficie d'une grande attractivité due à sa renommée (près de 30 doctorants, plus de 15 post-docs sur la dernière période, de nombreux visiteurs). La dynamique est remarquable avec un doublement du flux de doctorants et post-docs en 4 ans.

Appréciation sur la gouvernance et la vie de l'unité :

A l'issue des différentes rencontres du comité avec les chercheurs, doctorants, post-doc et ITA, il apparaît très clairement qu'il fait bon vivre dans ce laboratoire. Le comité tient à souligner l'excellent travail du directeur qui a su faire régner dans l'unité un climat agréable en mettant au service de tous les ressources du laboratoire. L'analyse fine des activités du laboratoire et de la bibliographie par thèmes et sous-thèmes révèle toutefois un certain cloisonnement limitant les échanges entre groupes (nanotubes, simulations de la dynamique des dislocations, plasticité en milieu confiné, champ de phase, EELS et phonons, quasicristaux...) lesquels sont souvent composés de deux permanents, voire d'un seul (phases MAX). Une plus grande communication entre domaines connexes et une



mutualisation accrue des savoirs serait profitable. Par ailleurs, compte-tenu de ses forces, le laboratoire devra affiner sa stratégie scientifique par une définition plus affirmée de ses priorités.

Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans :

Le projet présenté, très ambitieux, porte sur de nombreux sujets novateurs (endommagement et plasticité, microscopie électronique basse tension pour l'observation des nanotubes, synthèse et étude de graphène...) ou parfois les défis sont importants et la concurrence forte. Les questions clé et verrous associés ont été clairement identifiés avec une grande pertinence.

Au plan instrumental, on peut s'interroger sur la faisabilité d'équiper le TEM ZEISS d'un correcteur d'aberration géométrique. S'agit-il d'un correcteur sur l'image pour le mode TEM ou sur la sonde pour le STEM, sachant que la perte de résolution à 80 keV existe sur les deux modes. Par ailleurs, à l'instar du domaine de la dynamique des dislocations ou une valorisation est faite (logiciel LEM ouvert « MicroMegas »), les activités champ de phase ne pourraient-elles pas être davantage valorisées via la conception d'une plateforme commune ouverte ?

S'agissant du projet dans son ensemble, le comité partage la perception que les moyens du LEM ne sont pas à la mesure de l'ambition portée. La variété des sujets abordés, des techniques expérimentales utilisées et des approches théoriques mises en œuvre pourrait être une source de problèmes au vu des forces actuelles. La prise en compte de l'activité microscopie électronique dans la stratégie du laboratoire en termes de ressources humaines ne semble pas être à la hauteur des défis posés. Fonctionner avec un faible rapport permanents/non-permanents rend difficile la bonne transmission des connaissances et la pérennisation du savoir dans l'équipe. Sans un flux de recrutement compensant les départs, ce sur quoi la direction actuelle milite ardemment, la faisabilité du projet dans son ensemble sera partiellement compromise sauf à procéder à une hiérarchisation des sujets et une politique scientifique plus resserrée en termes de priorités.

Appréciation sur l'implication de l'unité dans la formation :

Malgré son éloignement du monde universitaire, le laboratoire est bien impliqué dans la diffusion des connaissances scientifiques (publications et conférences de vulgarisation, enseignements, ..). Les chercheurs du LEM interviennent régulièrement dans les formations de l'enseignement supérieur : Paris-Diderot, Ecole des Mines de Paris, UVSQ, Ecole Polytechnique, master MAGIS qui réunit six établissements partenaires dans la région Ile de France comme l'ENS Cachan, l'UPMC, Paris Tech etc.

Le LEM est par ailleurs très impliqué dans les écoles de formation (CNRS, Mecamat...). On compte 5 écoles durant la dernière période pour lesquelles le LEM est intervenu.

Le LEM a doublé en 5 ans son nombre de doctorants (près de 30 aujourd'hui), ce qui montre l'apport croissant du laboratoire dans la formation par et à la recherche. Enfin, le LEM organise des séminaires internes réguliers (une douzaine par année) en invitant des conférenciers externes de premier plan, notamment dans le domaine de la modélisation.



4 • Notation

À l'issue des visites de la campagne d'évaluation 2011-2012, les présidents des comités d'experts, réunis par groupes disciplinaires, ont procédé à la notation des unités de recherche relevant de leur groupe (et, le cas échéant, des équipes internes de ces unités).

Cette notation (A+, A, B, C) a porté sur chacun des quatre critères définis par l'AERES. Elle a été accompagnée d'une appréciation d'ensemble.

Dans le cadre de cette notation, l'unité de recherche concernée par ce rapport (et, le cas échéant ses équipes internes) a (ont) obtenu l'appréciation d'ensemble et les notes suivantes :

Appréciation d'ensemble de l'unité LEM :

Unité dont la production et le rayonnement sont excellents. L'organisation, l'animation et le projet sont très bons.

Tableau de notation :

C1	C2	C3	C4
Qualité scientifique et production.	Rayonnement et attractivité, intégration dans l'environnement.	Gouvernance et vie du laboratoire.	Stratégie et projet scientifique.
A+	A+	A	A



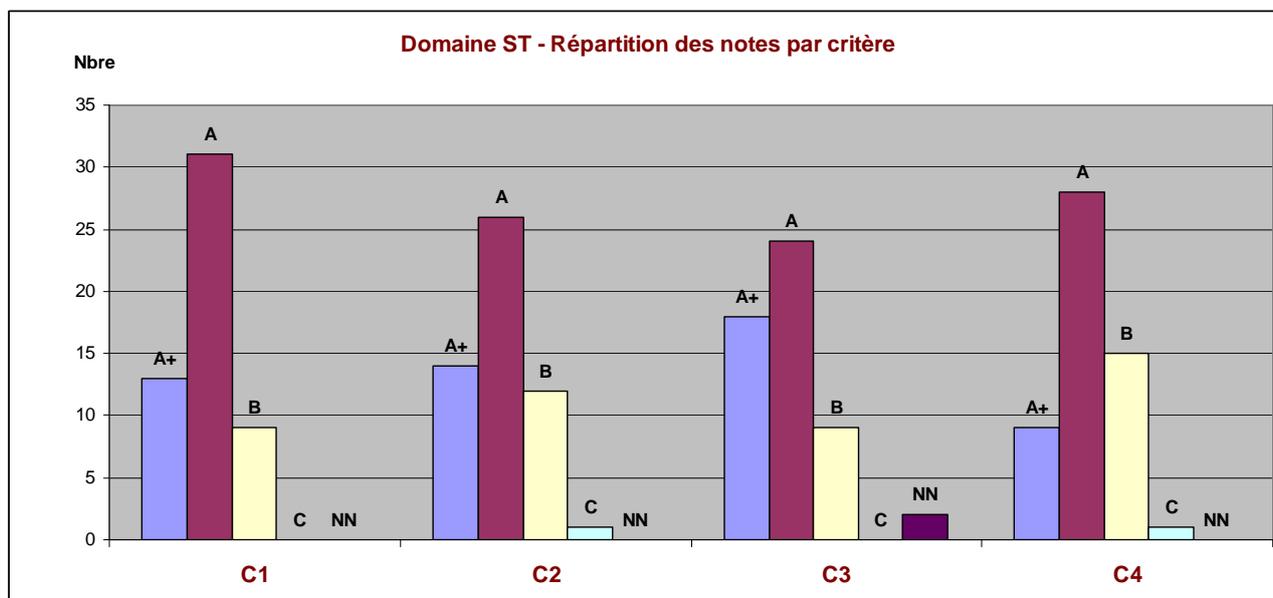
5 • Statistiques par domaine :

Notes

Critères	C1	C2	C3	C4
	Qualité scientifique et production	Rayonnement et attractivité, intégration dans l'environnement	Gouvernance et vie du laboratoire	Stratégie et projet scientifique
A+	13	14	18	9
A	31	26	24	28
B	9	12	9	15
C	-	1	-	1
Non noté	-	-	2	-

Pourcentages

Critères	C1	C2	C3	C4
	Qualité scientifique et production	Rayonnement et attractivité, intégration dans l'environnement	Gouvernance et vie du laboratoire	Stratégie et projet scientifique
A+	25%	26%	34%	17%
A	58%	49%	45%	53%
B	17%	23%	17%	28%
C	-	2%	-	2%
Non noté	-	-	4%	-





6 • Observations générales des tutelles



Réponse au rapport d'évaluation de l'AERES

Laboratoire d'Etude des Microstructures

Le LEM enregistre avec satisfaction les appréciations portées par le Comité d'Expertise sur la qualité de ses recherches, sa visibilité internationale, son intégration forte dans le tissu de la recherche et enfin, sur le caractère novateur et ambitieux de son projet scientifique.

Le comité a souligné certains points que nous reprenons ci-dessous.

Equipements en microscopie électronique:

Nous avons indiqué notre souhait d'équiper notre microscope ZEISS d'un correcteur d'aberrations sphériques de l'étage condenseur. Le but est d'améliorer la brillance au niveau de l'échantillon en mode STEM et nanosonde essentiellement à 200 kV. Ce type d'accessoire est disponible commercialement et déjà installé dans plusieurs microscopes de même type, en particulier en Allemagne.

Notre réflexion concernant l'acquisition d'un microscope basse tension pour l'étude des matériaux carbonés est actuellement à un stade très préliminaire, raison pour laquelle il ne figure pas dans notre document écrit. Nous avons cependant jugé utile d'en informer le comité lors de sa visite, en précisant qu'il s'agissait d'un projet à mener dans le cadre d'un partenariat avec nos collaborateurs du plateau de Saclay à l'occasion de notre future implantation sur le site Palaiseau de l'Onera.

Mutualisation des savoirs et communication interne:

Les thèmes abordés au LEM sont variés et les effectifs peu nombreux. Le nombre de collaborateurs permanents par thématique est donc nécessairement restreint. Malgré cela, nos travaux sont clairement identifiés et reconnus sur la scène internationale, comme a pu le souligner le comité. Les interactions entre permanents sont quotidiennes et, si elles ne se traduisent pas nécessairement sous forme de publications, participent fortement à notre réflexion et à l'avancée de nos études.

Recrutements, projet scientifique:

Le comité a souligné le caractère novateur de notre projet, tout en s'interrogeant sur son adéquation à l'effectif actuel. Notre projet a été élaboré avec toute la réflexion nécessaire. Nous avons identifié les avancées qui nous paraissent les plus pertinentes au regard de l'environnement dans lequel nous évoluons. Nous proposons une trajectoire qui est à notre portée. Nous savons bien sûr que notre laboratoire est en sous-effectif. Nous avons insisté sur ce point dans les documents et au cours de nos présentations. Nous sommes conscients qu'il faudra échelonner nos activités futures et que leur degré d'avancement sera lié à l'accroissement de nos effectifs. Nous avons précisé la volonté de

recruter. Nous agissons sur ce point depuis plusieurs années auprès de nos deux tutelles et apprécions le soutien du comité sur cet aspect.



Alphonse FINEL
Directeur

