



**HAL**  
open science

## UMPhy - Unité mixte de physique (CNRS, THALES) Rapport Hcéres

► **To cite this version:**

Rapport d'évaluation d'une entité de recherche. UMPhy - Unité mixte de physique (CNRS, THALES). 2015, Centre national de la recherche scientifique - CNRS. hceres-02032648

**HAL Id: hceres-02032648**

**<https://hal-hceres.archives-ouvertes.fr/hceres-02032648v1>**

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 :

Unité mixte de Physique

UMPhy

sous tutelle des

établissements et organismes :

Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS

Université Paris-Sud



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 2006<sup>1</sup>,*

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

*Au nom du comité d'experts,*

- M. Alain FONTAINE, président du  
comité

---

<sup>1</sup> 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 :	Unité mixte de Physique
Acronyme de l'unité :	UMPhy
Label demandé :	UMR
N° actuel :	137
Nom du directeur (2013-2014) :	M. Frédéric NGUYEN VAN DAU
Nom du porteur de projet (2015-2019) :	M. Frédéric NGUYEN VAN DAU

# Membres du comité d'experts

Président :	M. Alain FONTAINE, Fondation Nano-Sciences, Grenoble
Experts :	M. Jean-Paul CASTERA, THALES groupe
	M. Pietro GAMBARELLA, ETH Zurich, Suisse
	M. Jean-Michel GERARD, INAC, CEA, Grenoble
	M. Jens KREISEL, CRP Gabriel Lippmann, Luxembourg
	M. Olivier LLOPIS, LAAS, Toulouse
	M. Bernard PLACAIS, LPA, Paris
	M <sup>me</sup> Isabelle SAGNES, LPN, Marcoussis
	M. Laurent SIMON, IS2M, Mulhouse (représentant du CoNRS)
	M <sup>me</sup> Nathalie VIARD, IPCMS, Strasbourg



## Délégué scientifique représentant de l'AERES :

M. Charles HIRLIMANN

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

M. Etienne AUGE, Université Paris Sud

M. Jean-Marc BERROIR (Directeur de l'École Doctorale n°107 Physique Île-de-France)

M. Christian BONHOMME (Directeur de l'École Doctorale n°397 Physique et chimie des matériaux)

M. Cédric DEMEURE, THALES

M. Giancarlo FAINI, CNRS INP



## 1 • Introduction

### Historique et localisation géographique de l'unité

Créé en 1995, inséré dans une entreprise « high tech » ce laboratoire de recherche fondamentale CNRS-Thales -Thomson CSF à l'époque-, associé à l'Université Paris-Sud en 2000, apporte une réponse aux nécessités actuelles de la recherche et de l'innovation dans les pays occidentaux. La disparition de nos prestigieux laboratoires de recherches dans les grandes entreprises orientés très amont a asséché une filière efficace et naturelle de l'innovation. Le concept de l'étagère où l'industriel trouve, dans les laboratoires académiques, les résultats dont il a besoin n'ayant plus qu'à réaliser l'assemblage pour créer un produit à mettre sur le marché, a fait long feu : il a mis plus de 10 ans à prouver son entière vanité et sa totale inefficacité.

Sans épiloguer sur les moteurs qui ont piloté cette désertification dont souffrent les entreprises et leurs ingénieurs-chercheurs, il faut sans doute souligner que le concept des laboratoires CNRS mixtes avec une entreprise très colorée nationale est une réponse, fructueuse, pour pallier l'absence directe des entreprises sur le front de la création des connaissances.

Ces quatre dernières années, l'effectif des permanents est resté stable (6 départs/7 arrivées) tandis que le nombre de non permanents (doctorants et post-docs) a cru de 50 %.

### Équipe de direction

Directeur : M. Frédéric NGUYEN VAN DAU

Directeur-Adjoint : M. Frédéric PETROFF

Directeur scientifique : M. Albert FERT

### Nomenclature AERES

ST2

### Effectifs de l'unité

Effectifs de l'unité	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
<b>N1</b> : Enseignants-chercheurs titulaires et assimilés	4	4
<b>N2</b> : Chercheurs des EPST ou EPIC titulaires et assimilés	15	17
<b>N3</b> : Autres personnels titulaires (n'ayant pas d'obligation de recherche)	11	9
<b>N4</b> : Autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)	1	1
<b>N5</b> : Autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, Post-doctorants, visiteurs etc.)	14	
<b>N6</b> : Autres personnels contractuels (n'ayant pas d'obligation de recherche)	2	
<b>TOTAL N1 à N6</b>	<b>47</b>	<b>31</b>



Effectifs de l'unité	Nombre au 30/06/2013	Nombre au 01/01/2015
Doctorants	17	
Thèses soutenues	20	
Post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	26	
Nombre d'HDR soutenues	6	
Personnes habilitées à diriger des recherches ou assimilées	10	13

## 2 • Appréciation sur l'unité

### Avis global sur l'unité

Excellente unité, ayant réalisé à la fois une recherche nobélisée (M. Albert FERT, 2007) et un ensemble de recherches bien ciblées, développées sur toutes les composantes au meilleur niveau international, une insertion dans une entreprise high-tech, sans équivalent en France, avec des ouvertures très réussies, opérant avec des « boîtes à outils » uniques, l'UMPhy est localement un pôle de l'Île-de-France très attractif, au cœur d'une forte dynamique locale et au-delà, identifiée au plus haut niveau international. Les équipes les plus performantes des laboratoires voisins sont insérées dans des opérations structurantes et fertiles. Au sein de l'IDEX et plus généralement de l'opération « Plateau de Saclay », l'UMPhy joue un rôle essentiel avec toute la réactivité souhaitable, pilote quand c'est pertinent, collaboratif chaque fois que c'est nécessaire. Thales s'insère ainsi naturellement dans ces opérations structurantes avec les partenaires, laboratoires, écoles, universités, responsabilités dans l'enseignement et l'administration du site à tous les niveaux.



### 3 • Appréciations détaillées

Le présent est brillant au regard de tous les critères quantitatifs et de leur dérivée première. Il en est de même au travers des analyses qualitatives.

#### Analyse : Applications Thales

*Cette section, dans une situation de laboratoire académique classique, serait sans doute segmentée et répartie au sein des sections consacrées à chaque thème scientifique. Il apparaît évident que chaque tutelle trouvera avantage à cette présentation unique, donnant l'éclairage le plus pertinent pour justifier l'aventure partagée entre Thales et le CNRS, associé aux universités. Cette mise en perspective « consolidée » est doublement nécessaire avec la montée en puissance du campus Paris-Saclay. Elle apporte évidemment des informations qui seront également présentes dans les autres sections.*

L'organisation présente et le fonctionnement de l'UMPhy, ont été souhaités par Thales : cette lisibilité accrue de l'UMPhy, est efficace pour conduire à l'émergence d'applications pouvant intéresser le Groupe.

Trois exemples illustrent ce rapprochement : des expériences mêlant la spintronique et l'optique sont aujourd'hui conduites par des chercheurs de l'UMPhy et des chercheurs de Thales Research&Technology (TRT) dans des laboratoires d'optique de TRT.

L'opération de recherche transverse sur le traitement cognitif de l'information, a construit des liens entre le groupe de recherche STI de TRT dont les activités de recherche logicielle ont toujours été difficiles à rapprocher des activités de recherche « hardware », et l'UMPhy. Aujourd'hui, des chercheurs de l'UMPhy sont en lien direct avec des ingénieurs des divisions de Thales pour discuter de l'impact potentiel de leurs découvertes dans les domaines de ces divisions. Le rapprochement TRT/UMPhy s'est également concrétisé par le biais de contrats de recherche en commun (Europe, ANR,...). Ces échanges donnent aux deux parties une ouverture vers des mondes qu'ils ne connaissaient pas ou qu'ils connaissaient mal.

Cette forme de collaboration et de mutuelle imprégnation a valeur de modèle pour relancer l'innovation et permettre aux entreprises de notre pays d'avoir une avance technologique.

Les moyens humains et matériels n'étant pas infinis, l'UMPhy a fait le choix d'explorer plus particulièrement les projets suivants : « Nanoélectronique », « Front-end hyperfréquence » et « Traitement cognitif de l'information ». Ce choix est judicieux à plus d'un titre : les thèmes choisis mettent à profit les meilleures compétences de l'UMPhy et favorisent les échanges entre les trois grands domaines de ce laboratoire. Ils sont réellement susceptibles de déboucher sur des applications qui intéressent les grands métiers de Thales.

#### Traitement cognitif de l'information

L'opération de recherche transverse « Traitement cognitif de l'information » a été définie et mûrie après l'avoir remise dans le contexte plus global de la problématique des architectures de calcul et des limitations associées, notamment des limitations physiques que vont rencontrer les technologies utilisées aujourd'hui dans les processeurs. Il fallait donc un changement de paradigme, le choix s'est porté sur les architectures de calcul bio-inspirées, et le développement de nouveaux composants capables d'émuler la plasticité des synapses. Le choix original de l'UMPhy d'étudier des memristors qui ne reposent pas sur des phénomènes physiques affectant l'intégrité des matériaux est très judicieux, tout comme l'est le développement de memristors ferroélectriques et spintroniques originaux (et brevetés) utilisant les travaux les plus amont de l'UMPhy. Cette nouvelle approche vient en complément des processeurs séquentiels pour accélérer certaines fonctions clés. Les domaines d'application immédiats sont la reconnaissance et la classification de données.

#### « Front-end » hyperfréquence

Ce projet est source d'innovation de rupture dans le domaine du traitement analogique du signal hyperfréquence et dans la détection large bande.



### Spintronique et nanomagnétisme

Le transfert de spin permet de générer un signal hyperfréquence dont la fréquence est contrôlée via l'amplitude du courant continu de spin à l'origine de ce signal. Le composant qui en résulte est de taille nanométrique et l'accordabilité en fréquence ne nécessite plus l'emploi d'un électroaimant volumineux et coûteux.

Les travaux sur la magnonique sont à l'échelle nanométrique un « remake » des études sur les ondes magnétostatiques avec toutefois des différences significatives. Ainsi, on considère des couches nanométriques alors qu'elles étaient micrométriques dans le cas des ondes magnétostatiques. Une différence fondamentale réside dans la possibilité d'exciter et de détecter efficacement ces ondes, respectivement par transfert de spin et par effet Hall de spin inverse. Dans le cas des ondes magnétostatiques, l'excitation et la détection étaient inductives.

Ces travaux devraient déboucher sur des composants tels que résonateurs, filtres, oscillateurs accordables, lignes à retard, lignes dispersives,... dans des dimensions nanométriques, ce qui était impensable il y a seulement 10 ans.

### Supraconducteurs et traitement du signal hyperfréquence

#### Filtres RF supraconducteurs

Cette activité a atteint un niveau de maturité de type TRL3 qui a permis de franchir pour cette activité l'« Initial Gate », un jalon interne dans Thales permettant d'envisager le transfert de cette technologie dans les divisions du Groupe.

#### SQIF RF (Superconducting Quantum Interference Filter RF)

La maîtrise de la réalisation de jonctions Josephson reproductibles par centaines de milliers est une prouesse technologique qu'a réussie l'UMPhy en étroite collaboration avec le Laboratoire de Photonique et Nanostructures pour la lithographie électronique. Elle permet d'envisager tout un champ d'applications de cette technologie dans le domaine de la détection électromagnétique. Cette performance fut récompensée par un « gold Thales Innovation Award » courant 2013 à la suite d'une compétition interne qui concerne l'ensemble des sites de Thales dans le monde entier.

### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

Sur ces vingt dernières années, l'UMPhy a su développer au meilleur niveau d'excellence internationale ses thèmes pionniers fondateurs, la spintronique, les oxydes à propriétés remarquables, et entrer dans des champs de recherches nouveaux que nul n'avait imaginé. Cette forte réactivité de l'UMPhy n'est pas une réponse aux évolutions scientifiques mondiales mais une anticipation, une création de nouveaux champs. Des pistes sont ouvertes sur de très beaux projets, solides et en nombre significatif. Les nouvelles configurations, les nouveaux programmes avec les équipes de Thales, construits ces dernières années, ont une vitalité irréversible, d'amplitude très significative.

Une modulation plus fine et plus précise de ces dernières appréciations est produite dans l'analyse détaillée, thème par thème.

Les indicateurs quantitatifs les plus pertinents de la production de programmes de recherches et de résultats se déclinent ainsi :

- pour la période 2008-2013, les 185 publications (20 chercheurs) se répartissent en 38 Applied Physics Letters, 24 Physical Review Letters, et 18 Nature X, avec 20 publications déjà citées plus de 50 fois, 13 plus de 100 fois. Ces nombres se traduisent aussi en conférences invitées : 404 dont 90 % dans des conférences internationales, soit plus de 60 par an sur les six années ;

- les brevets sont en augmentation forte : 24 au total, ce qui donne une augmentation de 70 % par rapport à la période précédente. 87 % des chercheurs et enseignants chercheurs, 80 % des ingénieurs de recherche contribuent à ce bilan. 50 % des brevets sont dans le domaine « beyond CMOS » ;



- 20 thèses furent soutenues, 18 sont en cours, 5,5 sur contrats CIFRE Thales, 5 sur contrats Écoles Doctorales et BDI-CNRS, les autres sur les contrats de recherches. 26 post-doctorants accueillis, 11 sont en cours. Dix HDR dont 6 soutenues sur la période d'évaluation, 2 soutenances prévues en 2014. Depuis 1995, le devenir des doctorants est renseigné à une unité près : 13 ont été recrutés au CNRS, 9 à l'université, 4 sur d'autres secteurs publics, 21 dans le secteur privé, 10 en post-docs.

Les collaborations, dont 72 en France, relient l'UMPhy quasiment à tous les continents : 23 en Europe, 5 aux USA, 3 en Amérique du Sud, 3 en Russie, 2 en Chine, 3 au Japon, 1 en Australie.

Le budget de 2011, 7 M€ environ, se présente en trois parts, salaires 37 %, 25 % pour l'infrastructure, et 38 % pour investissement et fonctionnement. Pour cette troisième composante de 38 %, 3/10ème proviennent des ressources contractuelles alimentées à plus de la moitié par les contrats européens, et presque 4/10ème par les ressources ANR. La dotation Thales est stable depuis cinq ans, celle du CNRS a décru régulièrement de près de 15 % sur la même période.

### Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

- 490 articles référencés dans Word of Sciences depuis la création du laboratoire ;
- 84 articles ont été cités plus de 50 fois (dont 39 articles plus de 100 citations) ;
- le nombre de citations a doublé depuis 2007 ;
- 800 conférences invitées et workshops ;

#### Distinctions

- 3 prix de thèse ;
- grand prix Lazare-Carnot de l'Académie ;
- grand prix Jacques Herbrand de l'Académie 2010 ;
- prix Ancel 2008 et Médaille d'Argent CNRS 2010 ;
- EU-40 Materials Prize E-MRS ;
- Thales Innovation Award Or 2013 ;
- nomination IUF Junior
- 3 ERC en cours : Advanced et Consolidator (récente décembre 2013) sur le thème oxydes fonctionnels, 1ERC (starting) pour l'opération transverse « Traitement cognitif de l'information ».

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

Plusieurs opérations majeures ont été mises en œuvre depuis 2008 :

- Sur le volet investissement d'avenir, l'UMPhy est partenaire, dans deux LABEX (NanoSaclay et Palm), un EQUIPEX, (Tempos). L'UMPhy est animateur et bénéficiaire du DIM Nano-K (Région Ile de France) issu du DIM C'Nano.

- L'évolution du rapport recherche applicative/recherche amont suit les recommandations du précédent comité de l'AERES et conduit à un équilibre qu'il faut conforter afin d'en retirer le maximum de bénéfices, tant sur le plan scientifique et le positionnement international du laboratoire que sur le plan applicatif, par la génération de ruptures technologiques potentielles dans les domaines qui intéressent la tutelle industrielle.



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

La structuration actuelle du laboratoire donne une grande lisibilité. Les projets qui y sont conduits permettent à la fois un très haut niveau de recherche tout en explorant les applications potentielles de ces travaux pour les besoins des grandes divisions de Thales.

Une autre caractéristique de ce laboratoire est son fonctionnement « en commando » et sa faculté à mettre en sommeil des travaux au profit de nouvelles pistes de recherche plus prometteuses.

Cette souplesse et cette capacité d'adaptation sont pour la tutelle industrielle, très précieuses, car elles permettent d'avoir très rapidement une idée du potentiel d'une nouvelle technologie ou d'une découverte, de déposer des brevets clés et de disposer ainsi d'une avance concurrentielle.

L'organisation du laboratoire en trois thèmes, spintronique et nanomagnétisme, oxydes fonctionnels, supraconducteurs à haute température critique (SHTC) et traitement du signal, et l'interaction avec les laboratoires de TRT, ont fait émerger des projets communs de recherches susceptibles de déboucher sur des applications intéressant le Groupe Thales dans les domaines suivants :

- photonique intégrée ;
- nanoélectronique ;
- circuits quantiques ;
- front-end hyperfréquence ;
- traitement cognitif de l'information ;
- détection et imagerie sub-millimétrique et THz.

Les moyens humains et matériels n'étant pas infinis, l'UMPhy a fait le choix d'explorer plus particulièrement les projets suivants : "Nanoélectronique", "Front-end hyperfréquence" et "Traitement cognitif de l'information". Ce choix est judicieux à plus d'un titre. En effet, les thèmes choisis mettent à profit les meilleures compétences de l'UMPhy et favorisent les échanges entre les trois grands domaines de ce laboratoire. Par ailleurs, ils sont ceux qui sont susceptibles de déboucher sur des applications qui intéressent les grands métiers de Thales.

Cette évolution est un des points forts à retenir de ces dernières années depuis le dernier comité d'experts. Cette volonté a créé des liens supplémentaires avec les autres laboratoires de TRT, a amélioré la compréhension et la finalité des études de l'UMPhy par les ingénieurs de TRT et a permis une meilleure intégration de l'UMPhy dans TRT et plus généralement dans le Groupe Thales.

La vie du laboratoire est dominée par l'échange permanent que les uns et les autres pratiquent, traduisant une solidarité et une intégration rapide des nouveaux entrants.

La surface restreinte du laboratoire est une pression forte. Cela ne permet plus d'accueillir les étudiants M1, ce qui est dommage. Le retour du III-V lab quittant Marcoussis, pour s'insérer « au chausse-pied » dans le périmètre du bâtiment Thales-Palaiseau fait peser des menaces sur les surfaces et interdit d'envisager des solutions pour retrouver une marge de manœuvre d'accueil.

Les tutelles Thales et CNRS ont exprimé leur satisfaction entière au vu des réussites scientifiques, organisationnelles, du couplage recherche fondamentale, recherche finalisée, avancée sur un dispositif jusqu'à un niveau de TRL (Technology Readiness Level) 5-6 jamais atteint précédemment annonçant un très fort potentiel de transfert technologique.

## Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

Le directeur de l'École doctorale (ED 107, commune à l'ENS, P6, P7, P11) témoigne de la satisfaction entière donnée par l'UMPhy sur tous les fronts. L'UMPhy est aussi très liée historiquement à l'ED 397 (tutelle principale P6) qui l'a régulièrement soutenue au cours du mandat.



## Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

La vision « site » du projet 2015-2019 de l'UMPhy se décline en quatre grandes lignes directrices :

- Amplifier les liens existants et développer de nouveaux liens avec les laboratoires de Thales Research & Technology (TRT) : ce couplage est fondamental car il apporte une solution à un problème très ancien, celui du chaînon manquant entre recherche fondamentale et applications. Par ailleurs, les domaines explorés par l'UMPhy étant complémentaires de ceux étudiés par TRT, il y a enrichissement mutuel par le biais de ces échanges.

- Développer une vision applicative autour du domaine « Beyond CMOS » : l'orientation donnée aux travaux dans ce domaine durant le précédent mandat va dans le bon sens. Par ailleurs, le contexte et en particulier les limites que l'on commence à entrevoir avec les processeurs séquentiels vont favoriser l'émergence de nouvelles approches et ce thème transverse est une des réponses possibles.

- Poursuivre le développement de démonstrateurs avancés et les conduire si possible jusqu'au transfert vers les divisions de Thales. Mettre en chantier de nouvelles réalisations pour les technologies qui atteignent le seuil de maturité nécessaire : cette phase de recherche est absolument indispensable et est un passage obligé si l'on souhaite développer une technologie pour en faire un produit. Elle suppose également que l'UMPhy, TRT et les divisions partagent la même définition des TRL (Technology Readiness Level), c'est à dire des niveaux de maturité.

- Contribuer à la construction de l'Université Paris-Saclay : L'UMPhy est très bien placée pour contribuer à la représentation de Thales dans la construction de l'écosystème de recherche Paris-Saclay.

## Conclusion

Ce laboratoire est incontestablement une pépite du paysage français de visibilité mondiale qui repose sur :

- l'impressionnante qualité des résultats scientifiques, au meilleur niveau international ;
- l'ouverture de thèmes scientifiques originaux en recherche fondamentale et en recherche plus appliquée et la génération de propriétés intellectuelles ;
- son insertion, significativement accrue ces quatre dernières années, plus efficace puisqu'au niveau des équipes mêmes, dans un champ de collaborations avec des homologues Thales ;
- son impressionnante insertion dans les réseaux locaux, régionaux, nationaux et européens due à son rôle attractif majeur et une pratique fédérative gagnante-gagnante ;
- son implication doublement essentielle dans la dynamique du campus Paris-Saclay, essentielle dans les réseaux thématiques et les processus de gouvernance, essentielle pour l'entreprise Thales ;
- ses ressources humaines de grande qualité professionnelle et humaine, très soudées ;
- la qualité de sa gouvernance, attentive, réactive, disponible, très ouverte en interne comme en externe, soucieuse de produire synthèse et décision pour enrichir le dynamisme et les qualités de tout le personnel du laboratoire.

Qualitativement, deux préoccupations sont identifiées, la diminution du personnel en soutien technologique et les contraintes dues aux surfaces limitées des laboratoires et des bureaux dans le bâtiment Thales.

## 4 • Analyse thème par thème

**Thème 1 :** Spintronique et Nanomagnétisme

**Nom du responsable :** M. Frédéric NGUYEN VAN DAU et M. Frédéric PETROFF

**Effectifs**

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires	2	2
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	8	9.5
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	3	2.5
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)	1	1
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	13	
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants	8,5	
<b>TOTAL</b>	35,5	15

- 12 thèses soutenues/8,5 thèses en cours/13 post-doc
- 3 Prix de thèse
- Grand Prix Lazare-Carnot de l'Académie
- Nomination IUF Junior
- 104 articles réguliers RICL
- 216 conférences invitées
- 30 contrats (12 CE, 18 ANR)
- 7 brevets déposés.



## • Appréciations détaillées

### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

Ce thème, historique et emblématique du laboratoire, se divise aujourd'hui en trois opérations de recherche (transfert de spin, injection de spin dans les semiconducteurs et spintronique moléculaire).

La production scientifique de l'ensemble de ces opérations est exceptionnelle tant par sa quantité (104 articles sur la période) que par sa qualité (plusieurs articles dans Nature Physics, Nature Communications, Physical Review Letters, ...). L'originalité des thématiques et la qualité des approches expérimentales font de ce laboratoire une référence incontournable au plus haut niveau international dans le domaine de la spintronique. On remarque aussi une forte croissance de la production scientifique dans la période 2008-2013 par rapport aux années précédentes, qui correspond à un élargissement des champs de recherche.

Ce renouvellement illustre la capacité du laboratoire à proposer des problématiques de recherche très innovantes, qui sont ensuite reprises et amplifiées par la communauté internationale.

On mentionnera ici :

- les expériences sur les oscillateurs à transfert de spin à base de vortex, qui ont été étudiés en détail et pour lesquels l'utilisation astucieuse de double vortex a permis de débloquer un verrou à l'échelle internationale sur la puissance émise et la largeur de raie ;

- en parallèle, les simulations et les premières expériences sur la manipulation des « skyrmions » dans des couches minces ont réalisé une synthèse brillante entre une thématique issue des études fondamentales sur les matériaux à fortes corrélations électroniques et la spintronique ;

- les recherches sur les microstructures semiconductrices ont su profiter d'une collaboration stratégique avec le CEA Grenoble pour se réorienter vers l'injection de spins dans le Germanium et le Silicium qui apparaît très prometteuse et à l'état-de-l'art international ;

- l'activité sur la spintronique organique et moléculaire s'est rapidement positionnée comme incontournable malgré un contexte concurrentiel, avec des résultats pionniers sur l'injection de spin dans le graphène et des apports sur la compréhension de l'injection de spin dans les semiconducteurs organiques.

Le comité d'experts a été particulièrement impressionné par le support technique et la mise en place de nouveaux procédés d'élaboration et de caractérisation dédiés à ces matériaux.

### Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Avec 216 conférences invitées, le rayonnement international de ce thème est tout à fait exceptionnel. La notoriété d'Albert Fert - prix Nobel - y contribue pour une large part mais tous les membres du laboratoire, y compris les plus jeunes, y participent également fortement (nomination l'Institut Universitaire de France (IUF), grand prix de l'Académie des sciences, trois prix de thèse...).

Plusieurs membres participent à des expertises à tous les niveaux (European Research Council (ERC), septième plan cadre européen (FP7), CNRS, agence nationale de la recherche (ANR), réseau thématique de recherche avancée (RTRA...) et à l'organisation d'importantes conférences internationales (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), European Materials research Society (E-MRS), International Conference on magnetism (ICM), Joint European Magnetic symposia (JEMS), International Magnetism Conferences (INTERMAG), ...) et nationales (Colloque Louis Néel, journées de la matière condensée (JMC).

Le nombre des projets européens et nationaux obtenus par les chercheurs associés à cette thématique est tout à fait remarquable : (Graphene Flagship et Human Brain Project Flagship, 1 ERC, 4 projets STREP FP7, 2 projets STREP FP6, 2 Marie Curie Skłodowska Training Networks, 1 Marie Curie Skłodowska Fellowship, 1 ANR Blanc International, 6 ANR Blanc, 3 ANR Nanotechnologie et Nanosystèmes, 8 ANR PNANO, ...), s'ajoutent pour constituer un portefeuille de contrats très significatif, notamment si on rapporte celui-ci au nombre de chercheurs permanents de l'équipe.



L'implication dans les structures de Paris-Saclay semble notamment particulièrement importante pour le positionnement du laboratoire dans ce futur ensemble. Une partie du rayonnement de ce thème est basé sur un réseau de collaborations hors norme.

Ce réseau est généralement construit à l'aide d'une stratégie d'organisation de petites conférences internationales sur des domaines émergents. La solidité de ce réseau et la qualité des projets de recherche peut se constater aussi par le niveau des différentes collaborations, qui impliquent des groupes spécialisés en spintronique et graphène, qui comptent parmi les meilleurs en Europe, aux États-Unis d'Amérique et au Japon.

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

La culture de valorisation s'est particulièrement développée ces dernières années au sein de ce thème. Au delà du nombre de brevets déposés (7), la réalisation de démonstrateurs et une réflexion sur leur maturité technologique sont des signes très encourageants de transfert technologique. La réalisation d'un prototype de détecteur hyperfréquences avec Thales basé sur les oscillateurs à transfert de spin est un jalon très important dans la vie du laboratoire car il correspond au premier intérêt industriel de Thales pour la recherche pionnière de l'unité en spintronique.

De la même façon, les architectures à base de memristors et la réalisation de filtres magnoniques peuvent représenter un potentiel d'innovation pour Thales.

Le comité d'experts tient à souligner l'importance des développements techniques comme brique de base de ces innovations, que ce soit la réalisation de couches ultraminces de YIG à l'état-de-l'art international ou des alliages d'éléments immiscibles comme Au-W (brevet et projet de start-up).

La difficulté de trouver un partenaire industriel européen pour exploiter les inventions en spintronique est malheureusement un frein fort à la volonté des chercheurs de valoriser leurs travaux. Jusqu'à très récemment, la réticence des plate-formes technologiques de la microélectronique à investir le domaine de la spintronique a constitué un autre obstacle majeur pour la maturation des composants.

La décision récente du CEA Grenoble de mettre en place une filière spintronique en 300 nm peut à cet égard changer significativement le contexte. Le comité d'experts encourage l'équipe à étendre ses interactions avec le CEA Grenoble, excellentes pour les études amont, au domaine de la valorisation en renforçant ses liens avec le Leti et Spintec du CEA. Plus largement, une concertation renforcée entre les acteurs français apparaît comme très souhaitable pour valoriser au mieux la propriété intellectuelle (PI) nationale très riche dans le domaine de la spintronique.

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

Cf. laboratoire. Excellente à l'image de celle du laboratoire

### Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

Les thèses de doctorat soutenues entre 2008 et 2013 (13) et en cours (6) dans l'équipe sont toutes de très grande qualité et donnent lieu à des publications de haut impact. L'équipe a notamment une politique de valorisation de ses doctorants via le dépôt de dossier à des prix jeunes chercheurs qu'il convient de souligner. Au-delà de la formation doctorale, avec deux enseignants-chercheurs seulement dans l'équipe, dont un à l'Institut universitaire de France (IUF), l'implication dans l'enseignement en Master notamment ne peut être un point fort. Notons cependant que l'implication forte de l'un d'entre eux dans l'organisation de plusieurs écoles d'été à destination des doctorants (nanosciences IdF et synchrotron). Le suivi et l'insertion des doctorants est discuté au niveau du laboratoire.

### Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

La perception stratégique de ce thème par une structure aussi petite (mais peut-être est-ce là aussi sa force) est impressionnante. Les objectifs sont de rester pionniers en recherche fondamentale et de consolider les actions de valorisation avec Thales. Pour cela, les différents axes n'hésitent pas à arrêter (ou mettre en veille) certaines activités sans visibilité immédiate pour en démarrer de nouvelles. À posteriori, on peut par exemple considérer judicieux le choix de ne pas s'être lancé dans l'optimisation des barrières tunnel, trop coûteuses en équipement et en moyens humains.



Le projet de l'axe transfert de spin est axé sur la spin-orbitronique, sujet très actuel et très concurrentiel, sur lequel l'expertise d'Albert Fert a lancé l'équipe sur de bons rails. La compréhension des phénomènes d'effets Hall de spin et Rashba donne lieu à une grande activité internationale et l'équipe participe à cet effort.

Le projet sur les skyrmions est plus original et à très fort potentiel mais semble plus risqué. L'observation et la caractérisation de skyrmions est notamment difficile et nécessitera certainement des collaborations extérieures.

L'activité nouvelle en magnonique (peut-être sous-critique en moyens humains) est basée sur un développement technique très important (YIG en couche ultramince avec un amortissement très faible) qui donne une longueur d'avance au laboratoire pour revisiter des idées anciennes et réaliser des filtres hyper-fréquences pour une valorisation via Thales, en parfaite cohérence avec les objectifs généraux du laboratoire.

Le projet de l'axe semiconducteurs est double. D'une part, explorer l'injection de spin dans le Germanium et le Silicium, notamment via des effets de spin-orbitronique. La collaboration entre l'équipe du laboratoire et le CEA/INAC à Grenoble est parfaitement complémentaire et ne peut être qu'encouragée pour développer une compétence nationale de premier plan sur ce thème stratégique.

La deuxième partie du projet concerne la conversion d'un signal de spin en signal optique polarisé via l'insertion de dispositifs magnétorésistifs dans des VECSELS (Vertical-external-cavity surface-emitting-laser). Bien qu'intéressant et en collaboration avec un laboratoire de Thales, ce projet est risqué car les multiples compétences nécessaires (élaboration, modélisation, optique...) ne sont pas entièrement maîtrisées par le laboratoire dans un contexte où un membre de l'équipe part en année sabbatique à l'étranger.

Le projet de l'axe spintronique moléculaire est de mettre à profit les compétences techniques développées pour créer de nouvelles fonctionnalités dans les dispositifs spintroniques. L'injection de spin dans le graphène sera optimisée et utilisée pour la manipulation du spin. Cette dernière partie, très ambitieuse et à très fort impact potentiel, n'est pas détaillée à la mesure de sa difficulté dans le rapport. Sa réalisation expérimentale semble cependant difficile et nécessitera des développements techniques non encore maîtrisés. Concernant le transport à travers des semiconducteurs organiques, l'objectif est maintenant d'utiliser des molécules multi-fonctionnelles pour mettre en évidence de nouveaux effets de spintronique. Cette voie est très prometteuse. La difficulté résidera ici, malgré l'effort technique important investi sur l'élaboration des échantillons, à obtenir des résultats reproductibles et interprétables.

## Conclusion

Le thème Spintronique et Nanomagnétisme a su fortement se renouveler au cours de ces dernières années pour rester pionnier et garder son aura d'acteur majeur de la spintronique à l'échelle internationale. Bien que porté encore en partie par M. Albert FERT, le comité d'experts observe que la transition avec la jeune génération est réussie et que les projets actuels sont très dynamiques et innovants. Un point marquant de la période d'évaluation est le rapprochement de ce thème et du partenaire industriel, notamment via le projet de détecteurs ou de filtres hyperfréquences basés sur les savoir-faire du laboratoire (oscillateurs à transfert de spin et magnonique). Quasiment vingt ans après sa création, cette synergie laisse augurer des transferts de technologie prometteurs.

Hormis les résultats scientifiques et applicatifs, le comité d'experts tient aussi à souligner le rôle d'incubateur et de catalyseur que joue ce thème au sein de l'UMPhy. Beaucoup des projets les plus novateurs du thème « Oxyde fonctionnels » et des deux Opérations de recherche transverse, « Traitement cognitif de l'information » et « Systèmes hybrides supra/ferroïques », bénéficient de concepts, techniques de mesure, matériaux et procédés de nanofabrication développés au sein de la thématique Spintronique (par exemple, les recherches sur les jonctions tunnels multiferroïques, l'injection de spin dans un gaz électronique bidimensionnel à l'interface de deux oxydes, les memristors pour le développement d'architectures de calcul bio-inspirées).



▪ *Recommandations :*

- Étant donné la taille limitée de l'équipe et le nombre important de sujets, rester attentif au risque de sous-criticalité, en n'hésitant pas à arrêter certains projets quand d'autres démarrent.
- Poursuivre l'équilibre (déjà existant) entre applications de la spintronique court-terme et une vision long terme (beyond CMOS).
- Garder l'interaction forte avec les autres thèmes et axes transverses de l'unité.
- Motiver les acteurs institutionnels et d'autres laboratoires français (notamment Spintec, mais aussi autres) à une action commune pour valoriser la propriété intellectuelle dans le domaine de la spintronique.



**Thème 2 :** Oxydes fonctionnels

**Nom du responsable :** M<sup>me</sup> Agnès BARTHELEMY et M. Manuel BIBES

**Effectifs**

<b>Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein</b>	<b>Au 30/06/2013</b>	<b>Au 01/01/2015</b>
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires	2	2
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	2	2
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	2,5	2
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	9	
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants	3,5	
<b>TOTAL</b>	<b>19</b>	<b>6</b>

- 5 thèses soutenues/3,5 thèses en cours/9 post-doc
- 2 Prix de thèse (dont 1 doc en commun avec ORT « systèmes hybrides »)
- Prix Ancel 2008 et Médaille d'Argent CNRS 2010
- EU-40 Materials Prize E-MRS
- 50 articles réguliers RICL/ 3 mémoires d'invention
- 124 conférences invitées
- 11 contrats (dont 1 ERC Advanced et 1 ERC Consolidator fin 2013, et 6 ANR)



## • Appréciations détaillées

### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

Le thème « Oxydes fonctionnels » comprend trois opérations de recherche :

L'opération « Jonctions tunnel ferroélectriques » a débuté en 2008 et a trouvé son plein essor durant la présente période d'évaluation. Elle est à la base de l'une des deux bourses du European research council (ERC) obtenues au sein de l'équipe. La lecture résistive de l'information ferroélectrique qu'elle propose représente une rupture par rapport à l'actuelle lecture capacitive (destructive) des mémoires ferroélectriques.

1. Les remarquables avancées dans la connaissance de la physique des memristors ont également été mises à profit dans des développements communs avec l'opération de recherche transverse « Traitement cognitif de l'information », en collaboration avec Thales-R&T.

2. L'opération « Hétérostructures et matériaux multiferroïques » est la poursuite des travaux dédiés dans la période précédente au matériau multiferroïque modèle BiFeO<sub>3</sub> (BFO), qui attire un intérêt considérable dans la communauté internationale. Des études systématiques du matériau en couches minces en fonction de son état de contrainte ont par exemple permis d'établir son diagramme de phase magnétique complet. Les résultats présentés sont fruits d'une étude fondamentale qui place l'équipe toujours parmi les leaders mondiaux.

Il est important de souligner que les résultats obtenus ont également profité aux développements d'autres thèmes de recherche du laboratoire. BFO a été incorporé dans des hétérostructures supraconducteur/ferroélectrique, YBaCuO/BFO permettant une modification importante de la température critique supraconductrice de YBaCuO de l'ordre de 30 K selon l'état de la polarisation électrique de BFO. Le couplage aux propriétés ferroélectriques du BFO permettant donc de moduler la supraconductivité de l'YBaCuO à une échelle nanométrique et ainsi créer des réseaux de pièges pour les vortex. Ce travail remarquable s'inscrit dans le cadre de l'opération de recherche transverse « Systèmes hybrides supraconducteurs/ferroïques ».

3. L'opération « Interfaces d'oxydes pour l'électronique et la spintronique » poursuit les travaux concernant la présence d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) à l'interface entre les oxydes isolants LaAlO<sub>3</sub> (LAO) et SrTiO<sub>3</sub> (STO). L'équipe avait été la première, lors de la précédente période, à mettre en évidence ce 2DEG par observation directe par microscopie de champ proche CT-AFM. Dans la présente période, l'équipe a démontré la possibilité de faire une injection de spin dans ce 2DEG en utilisant une électrode de Cobalt, bien qu'une telle injection de spin directe et massive semblait a priori impossible en raison de la trop grande épaisseur de couche isolante de LAO utilisée (4 mailles). L'équipe a notamment montré que la présence de l'électrode de Cobalt permet l'existence d'un 2DEG pour une couche isolante ne comprenant qu'une maille de LAO. Ceci est un résultat majeur qui permet d'envisager des dispositifs de spintronique classiques à base de 2DEG.

Le thème « Oxydes fonctionnels » bénéficie d'une parfaite symbiose avec l'axe transverse « Matériaux et nanotechnologies », tout particulièrement en termes d'élaboration d'oxydes en couches minces par ablation laser pulsée et de nano-caractérisation par microscopie en champ proche.

La production scientifique de l'équipe est exceptionnelle : 50 articles sur la période considérée, dont 11 dans des journaux à très fort impact (2 Nature, 6 Nature Materials, 1 Nature Physics, 1 Nature Nanotechnology, et 1 Science). L'impact de ces travaux sur la communauté est considérable, comme en attestent les 124 communications invitées de l'équipe sur la période de référence.

### Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Le rayonnement et l'attractivité académique du thème « Oxydes fonctionnels » sont, à l'instar de ses production et qualité scientifiques, au plus haut niveau.

L'équipe animant le thème « Oxydes fonctionnels » joue un rôle structurant de la communauté scientifique par son implication régulière dans l'organisation de colloques et écoles internationales (16 colloques et écoles de portée internationale dans la période concernée).



Son travail est reconnu par l'attribution de prix scientifiques de haute importance, tels que la médaille d'argent du CNRS, le Prix Louis Ancel, ou encore le prix « Matériaux » de l'European Materials Research Society (EMRS) réservé aux chercheurs de moins de 40 ans.

L'équipe est impliquée dans 11 contrats de recherche, dont 2 bourses ERC (1 Advanced Grant et 1 Consolidator grant). C'est tout à fait remarquable si l'on considère le nombre de bourses de ce type qui sont attribuées, d'une part, et l'effectif de l'équipe, d'autre part.

Elle possède un excellent tissu de collaborations proches et durables avec un important nombre de laboratoires au niveau national, européen et international, tous leaders dans leur domaine de compétence.

Les post-doctorants recrutés par l'équipe sont de tout premier rang. Ils sont souvent premiers auteurs de publications dans des revues à très haut facteur d'impact et on les retrouve insérés dans des laboratoires leaders du domaine.

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

L'équipe envisage de manière systématique les développements applicatifs rendus possibles par les connaissances issues de ses recherches fondamentales. Quatre brevets attestent de cette démarche, ce qui est stimulant pour la communauté.

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

Le comité d'experts a perçu une équipe soudée et parfaitement complémentaire, qui a une remarquable perspicacité dans le choix de ses sujets de recherche, une parfaite efficacité scientifique dans leur étude, et une excellente lisibilité extérieure grâce à une très bonne communication. Soulignons l'excellente interaction de l'équipe avec les opérations de recherche transverses et les axes transverses de synthèse et de caractérisation.

### Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

Les membres de l'équipe interviennent dans les enseignements de nombreuses formations, dont une grande partie est basée soit à l'Université Paris-Sud soit à l'Université d'Evry qui sont les établissements de rattachement des deux enseignants-chercheurs de l'équipe.

On note également une participation forte et régulière à des écoles de portée internationale.

L'équipe encadre actuellement 3,5 thèses en adéquation avec son propre effectif. Les étudiants en thèse sont positivement stimulés et encouragés tôt dans leur thèse à faire des présentations orales lors des colloques internationaux. Cette formation a permis l'obtention de deux prix de thèse lors de la précédente période.

### Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Les perspectives du thème « Oxydes fonctionnels », tout en s'inscrivant dans la continuité des trois opérations de recherche en cours, envisagent le démarrage de nouvelles activités à fort potentiel.

De nouvelles phases stabilisées par des contraintes dans BiFeO<sub>3</sub>, récemment mises en évidence par l'équipe, seront étudiées pour leurs capacités en termes de magnétoélectricité et réponses magnoniques. L'effet magnétoélectrique sera également au cœur du projet concernant les jonctions tunnel ferroélectriques auxquelles on adjoindra des électrodes magnétiques. Ce projet sera encadré par une ERC pour encore deux ans.

Après l'étude de l'interface oxyde/oxyde particulière qu'est LAO/STO, c'est une étude systématique de nouveaux types d'interfaces d'oxydes pour l'électronique qui va être entreprise dans le cadre d'un projet ERC récemment accepté. Il s'agit d'étudier notamment la génération de nouvelles phases électroniques et magnétiques à l'interface entre des oxydes isolants de Mott-Hubbard comme les orthotitanates de terres rares, et des oxydes isolants à transfert de charge, comme les nickelates de terres rares.

Le projet global présenté est ambitieux mais réaliste car en parfaite cohérence avec les savoir-faire et connaissances de l'équipe, soutenu et encadré par 2 financements européens.



On notera que les oxydes objets d'étude du présent thème pourraient être des matériaux intéressants pour les opérations de recherche « magnonique » et « skyrmions magnétiques » présentées dans les perspectives du thème « spintronique et nanomagnétisme ».

## Conclusion

### ▪ *Avis global sur le thème :*

Recherche d'excellente qualité scientifique avec une reconnaissance internationale qui positionne l'équipe parmi les leaders mondiaux dans le domaine des oxydes fonctionnels.

Des résultats marquants et des publications à très haut facteur d'impact en nombre important, surtout si l'on considère le relativement faible effectif de l'équipe animant ce thème.

### ▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

Capitalisation systématique des connaissances scientifiques acquises sous forme d'opérations de recherche transverses, permise par une excellente communication entre les membres de l'ensemble du laboratoire mixte et les équipes de Thales-RT.

La cohésion de l'équipe, doublée de la qualité remarquable de ses membres, est un point fort pour le thème.

L'établissement du nouveau campus de Paris-Saclay et donc la proximité avec d'autres groupes de thématiques voisines adjoignant de nouvelles expertises de pointe ouvrira la porte à des nouvelles coopérations à forte valeur ajoutée.

### ▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

L'équipe présente un fort potentiel d'obtention de financements de projets, lui permettant de recruter du personnel CDD de haute qualité nécessaire pour répondre aux ambitions du groupe. La taille limitée des locaux pourrait se révéler être un frein à ce développement.

### ▪ *Recommandations :*

Poursuivre la stratégie de focalisation des efforts de recherche et de capitalisation des acquis, notamment en termes de maîtrise des matériaux.



**Thème 3 :** Supraconducteurs à haut Tc et Traitement du Signal

**Nom du responsable :** M. Jean-Claude MAGE, M. Javier BRIATICO, M. Bruno MARCILHAC

**Effectifs**

Effectifs du thème en Équivalents Temps Plein	Au 30/06/2013	Au 01/01/2015
ETP d'enseignants-chercheurs titulaires		
ETP de chercheurs des EPST ou EPIC titulaires	5	5,5
ETP d'autres personnels titulaires n'ayant pas d'obligation de recherche (IR, IE, PRAG, etc.)	2,5	1,5
ETP d'autres enseignants-chercheurs (PREM, ECC, etc.)		
ETP de post-doctorants ayant passé au moins 12 mois dans l'unité	1	
ETP d'autres chercheurs des EPST ou EPIC (DREM, etc.) hors post-doctorants		
ETP d'autres personnels contractuels n'ayant pas d'obligation de recherche		
ETP de doctorants	2	
<b>TOTAL</b>	10,5	7

- 2 thèses soutenues/2 thèses en cours/1 post-doc
- Thales Innovation Award Or 2013
- 16 articles réguliers RICL/ 5 mémoires d'invention
- 8 conférences invitées
- 9 contrats (dont 2 CE, 3 ANR, 1 DGA)

### • Appréciations détaillées

Le thème « Supraconducteurs à haut Tc et Traitement du Signal » a compté deux chercheurs CNRS, sur la période, un ingénieur de recherche CNRS, un technicien Thales et quatre ingénieurs Thales (retraite d'un ingénieur Thales en mai 2013). Il s'agit du seul thème de recherche de l'UMPhy où l'effectif Thales est supérieur à l'effectif CNRS. Pour autant, les recherches menées dans ce thème sont variées et vont de la physique fondamentale aux applications. La présence de deux chercheurs CNRS, relativement jeunes, constitue un atout important pour la jouvence scientifique de ce thème, qui pourra s'appuyer sur les travaux amont portés par ces chercheurs pour innover bien au-delà des thématiques classiques des applications des supraconducteurs à haute température. Ces thématiques, comme celles basées sur l'exploitation de la faible résistance de surface des films supraconducteurs, ont néanmoins connus récemment des développements particulièrement intéressants, avec une montée vers des niveaux



de maturité technologique (TRL, Technology Readiness Level) élevés et donc une possible introduction à court terme dans des systèmes Radio-Fréquence de Thales.

### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

Les travaux menés dans le thème « Supraconducteurs à haut  $T_c$  et Traitement du Signal » vont depuis les problématiques les plus amonts vers les applications : c'est un paysage très changeant, mais néanmoins relativement bien connecté. Le contrôle des réseaux de vortex, responsables des pertes résiduelles de ces matériaux à haute fréquence, pourrait conduire à des performances accrues, voire à de nouvelles fonctionnalités pour les couches supraconductrices. Des approches originales ont été implémentées dans ce but, en associant la couche supraconductrice à un réseau de défauts contrôlé.

L'opération de recherche transverse « systèmes hybrides supraconducteurs/ferroïques », que nous détaillerons un peu plus loin, se situe également dans cet objectif d'explorer des voies totalement nouvelles pour l'obtention de fonctionnalités différentes de celles de la supraconductivité classique. Le choix d'une technologie entièrement focalisée sur l' $YBaCuO$  semble judicieux, surtout à la lumière des résultats récents obtenus sur les réseaux de jonctions Josephson. Le développement d'une jonction Josephson fiable avec des matériaux à haute  $T_c$  constitue un verrou qui a longtemps bloqué le développement des applications de la supraconductivité, ne laissant à celles-ci que les applications à base de matériaux passifs (résonateurs, filtres...).

L'équipe supraconducteurs de l'UMPhy est parvenue à une technologie permettant la réalisation de réseaux de jonctions à grande échelle. Il s'agit de plus d'une technologie planaire, donc relativement facile à intégrer dans un système, et une première application à un réseau de SQUID a été présentée. Ce point constitue une avancée majeure pour ce domaine de recherche. La clé essentielle est la maîtrise du lien faible Josephson par implantation d'oxygène induisant un état métallique par surdopage local contrôlé optimisant la transmission électronique. La persévérance a payé : a été levé un verrou vieux de vingt ans qui compromettait les applications en électronique supraconductrice.

Les dispositifs RF passifs à base de couches minces d' $YBaCuO$  (résonateurs, filtres) ont atteint un excellent degré de maturité, permettant leur intégration dans des systèmes et le franchissement des niveaux de TRL associés à cette intégration. Les filtres RF en particulier présentent aujourd'hui un excellent coefficient de qualité, associé à des possibilités d'accord en fréquence grâce à une filière de commutateurs compatible cryogénique. Pour ces dispositifs, un point clef ayant permis la montée en TRL consistait à développer un système de refroidissement (cryogénérateur) compact et autonome, facile à inclure dans un système RF. Ce développement a été mené avec succès et le dispositif présenté est surprenant de compacité.

L'opération de recherche transverse « Systèmes hybrides supraconducteurs/ferroïques » explore une nouvelle voie associant l' $YBaCuO$  et des matériaux ferroélectriques. Cette approche se révèle prometteuse puisque des effets physiques tout à fait originaux ont pu être observés (ex : la réflexion d'Andreev dans un demi-métal). Un des points extrêmement originaux est l'écriture de zones normales et supraconductrices dans une couche mince d' $YBaCuO$  par effet de champ ferroélectrique, ceci grâce à la modulation de la température critique ( $T_c$ ) de la couche. On peut imaginer de nombreuses applications pour ce changement contrôlable et réversible de  $T_c$  (localisé ou non).

Cet ensemble, thème et axe transverse associé, a produit des travaux scientifiques particulièrement intéressants et de grande qualité, très appréciés dans le contexte Thales.

Ces travaux ont fait l'objet de publications de haut niveau (Nature, Physical Review, Journal of Applied Physics), du moins pour ce qui concerne le volet « amont » de l'activité (fonctionnalisation des films supraconducteurs et systèmes hybrides supraconducteurs/ferroïques).

Le volet plus applicatif de l'activité a naturellement fait l'objet de peu de publications. Globalement, le thème « supraconducteurs » dans son ensemble publie donc beaucoup moins que les autres thèmes du laboratoire (en particulier, la spintronique). Ceci est en partie compensé par un nombre de brevets important : 9 dépôts de brevets pour cette thématique (sur 24 au total pour l'ensemble du laboratoire).

Cette politique différente, induite par la forte composante Thales de cette thématique conduit à valoriser d'abord plutôt que de publier, voire pour certains résultats valoriser tout court. Un brevet se limite cependant parfois à une simple idée, et cette idée doit être validée par un dispositif. Lorsque le brevet est accepté, et que le dispositif a été réalisé et validé par l'expérience, il semble naturel de publier les résultats de cette expérience sans heurter le souci de confidentialité. Il nous paraît très important que cet effort soit fait, à la fois pour la visibilité internationale du laboratoire, la progression de carrière des chercheurs et la simple diffusion des connaissances scientifiques.



À titre d'exemple, la réalisation de jonctions Josephson fiables constitue une avancée extrêmement importante pour le domaine de la supraconductivité à haute  $T_c$ . Ce résultat peut faire l'objet d'une diffusion plus large (cela n'empêche ni le brevet, ni la possibilité de masquer certains points critiques de la technologie).

Pour la partie la plus proche des applications, une comparaison avec les approches classiques concurrentes aurait été bienvenue. Cette comparaison est relativement aisée à mener pour les résonateurs et les filtres, mais beaucoup plus complexe pour les systèmes actifs (détecteurs). Il est nécessaire de se positionner par rapport à la technologie semiconducteur (Si ou III-V), et d'identifier les domaines où la supraconductivité va apporter un avantage marqué.

### Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Compte tenu du faible rapport chercheurs CNRS/ingénieurs Thales dans la thématique « Supraconducteurs à haut  $T_c$  et Traitement du Signal », il n'est pas possible de comparer l'implication et l'attractivité académique de cette composante de l'UMPhy aux autres composantes de cette unité. Pour autant, la thématique en question bénéficie de l'image du laboratoire, et recrute à l'international (c'est d'ailleurs le cas des deux chercheurs CNRS). Nous avons confiance dans l'implication de ces chercheurs pour accroître dans les années à venir cette visibilité (l'un d'eux a d'ailleurs proposé cette année un projet ERC, ce qui est une très bonne initiative). Ce point va de pair avec les remarques effectuées sur les publications/brevets : il est important de mieux diffuser certains résultats pour accroître l'attractivité académique de la thématique.

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

Dans le cas d'un laboratoire commun CNRS-Entreprise « High-Tech », le choix du partenaire industriel est tout trouvé, sauf si celui-ci ne revendique pas les découvertes du domaine pour son activité propre. Ce n'est pas le cas dans la thématique « supraconducteurs » où Thales est fortement impliqué et très intéressé pour faire progresser grâce à cette nouvelle technologie ses dispositifs RF (gamme micro-onde et millimétrique, voire terahertz).

Les dispositifs RF passifs à base de couches minces à faible impédance de surface sont aujourd'hui en bonne voie pour un transfert (TRL 4 validé). Les nombreux brevets déposés autour des jonctions Josephson, de la génération millimétrique... laissent supposer que cet axe va contribuer dans une proportion importante aux activités d'innovation et transfert vers le produit des résultats de l'UMPhy.

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

La pertinence de cette thématique au sein du laboratoire est excellente. Elle est reliée aux autres thèmes du laboratoire par la problématique du magnétisme (inhérente aux supraconducteurs) et par une action transverse parfaitement positionnée entre les oxydes fonctionnels et les supraconducteurs. Il est essentiel de maintenir ces liens pour que la thématique « supraconducteurs » continue de s'enrichir des technologies et des approches croisées des thématiques voisines.

Un point devra être surveillé toutefois : il est nécessaire de maintenir une bonne cohésion de cette activité et d'éviter tout risque de séparation entre les problématiques des ingénieurs Thales (plus appliquées) et celles des chercheurs CNRS. Ceci suppose un effort des deux côtés : un souci des applications de la part des CNRS (c'est sans doute le cas aujourd'hui, et d'ailleurs il s'agit ici de chercheurs de la section 08) et une volonté de mieux diffuser les connaissances du côté des ingénieurs Thales (c'est beaucoup moins le cas, mais le blocage vient peut-être de niveaux hiérarchiques plus élevés).

### Appréciation sur l'implication dans la formation par la recherche

La thématique « Supraconducteurs » ne comprend que des CNRS et des ingénieurs Thales. Il est donc tout à fait normal que son implication dans l'enseignement soit faible. On notera néanmoins que les deux chercheurs CNRS sont chacun impliqués dans une tâche d'enseignement sur le domaine de la supraconductivité, ce qui constitue une démarche à encourager.



## Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Au niveau de la structure, la thématique « supraconducteurs » est bien connectée aux autres thématiques, en particulier grâce à la présence de l'axe transverse « supraconducteurs-ferroïques ». Il n'y a donc pas de raison de modifier une structure qui semble bien fonctionner.

Le projet se situe dans la continuité et la valorisation d'un certain nombre de thèmes scientifiques en cours d'étude. L'approche de la fonctionnalisation des films supraconducteurs est très intéressante et peut conduire à moyen terme à des applications. La détection de fréquence RF (fréquence-mètre) est proposée comme première application. Là encore, il faudra faire l'effort d'identifier l'apport de la supraconductivité par rapport aux techniques plus classiques de mesure de fréquence RF. Les mêmes remarques peuvent s'appliquer à la structure d'émission-réception millimétrique, qui semble un concept original mais risqué.

La valorisation des structures à base de jonctions Josephson planaires paraît très prometteuse. Sans doute ces structures trouveront-elles d'autres applications au-delà de celles proposées aujourd'hui (SQIF). Les technologies plus matures de filtres accordables seront complétées pour former une tête RF cryogénique. Il n'est pas exclu que ces deux types de technologies puissent être combinées à terme dans un système.

La montée en TRL de l'ensemble de ces composants est un souci légitime de l'UMPhy, qui démontre ainsi son apport à sa tutelle industrielle.

Les structures hybrides supraconducteurs-ferroélectriques ont permis l'obtention d'effets physiques tout à fait originaux, comme la modulation de la température critique dans un supraconducteur. Il est logique de vouloir mettre à profit ces effets dans des dispositifs pratiques. D'autres dispositifs originaux sont proposés, comme des jonctions Josephson supra-ferroélectriques, et méritent d'être étudiés.

De même, l'étude des structures hybrides supraconducteurs-ferromagnétiques s'inscrit bien dans les problématiques du laboratoire et la physique de ces dispositifs paraît très riche (en particulier l'état supraconducteur polarisé en spin). Enfin, les jonctions actives à base de graphène constituent une voie également très intéressante à explorer. Il faut néanmoins s'assurer que des forces humaines suffisantes pourront être affectées à chacune de ces recherches, qui restent difficiles aussi bien au niveau théorique que technologique.

Au final, le projet présenté semble cohérent et scientifiquement riche. Il est également bien équilibré entre applications/valorisation et recherche de base.

Revisiter des sujets avec des combinaisons de matériaux, servies par des apports technologiques planaires fiables (simplicité, reproductibilité, directement adaptable aux échelles plus grandes) a permis de créer de nouvelles percées, de mettre en évidence des phénomènes nouveaux, seulement rêvés précédemment. Le message sur ce thème particulier est de maintenir l'axe de recherche fondamentale, tout en exploitant ces nouvelles voies de l'innovation.



**Thème 4 :** Opération de recherche transverse : Traitement cognitif de l'information

**Nom du responsable :** M<sup>me</sup> Julie GROLLIER

### Effectifs

- Effectif permanent impliqué : ~ 3 ETP
- 1 thèse soutenue et 3 thèses en cours (dont 3 en commun avec les thèmes)/3 post-doc
- Grand Prix Jacques Herbrand de l'Académie 2010
- 7 articles réguliers RICL/ 3 mémoires d'invention
- 22 conférences invitées
- 3 contrats CE (dont 1 ERC Starting) et 1 contrat ANR
- Preuve de concept expérimentale des memristors « spintronique » et « ferroélectrique » brevetés en 2009. Thèse de A. Chantbouala.

### • Appréciations détaillées

#### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

L'opération transverse rassemble les compétences de l'UMPhy pour démontrer le rôle clé des nano-composants multifonctionnels (neurones), pour des architectures, un traitement et des calculs bio-inspirés. Les processeurs actuels sont menacés par un échauffement excessif qui conduit à limiter la fréquence de commutation des transistors et à adopter une stratégie multi-cœurs, tout en faisant face au nombre croissant de défauts liés à la miniaturisation.

En 2009 sont brevetés deux nouveaux composants, les memristors ferroélectrique et spintronique, Le premier s'appuie sur l'électro-résistance tunnel dans des jonctions tunnel avec une barrière ferroélectrique ; le deuxième concept est lié au déplacement d'une paroi induit par transfert de spin dans les matériaux ferromagnétiques. Dans les deux cas, la variation de résistance est d'origine purement électronique.

Publié dans Nature-Physics 2011, l'état de memristor spintronique à 3 états stables correspond à trois états stables de la paroi. Le memristor commute en moins d'une ns, avec une faible densité de courant, soit des vitesses de paroi atteignant une vitesse record de 600 m/s.

Le memristor ferroélectrique est une jonction tunnel ferroélectrique entre deux électrodes métalliques. Le renversement de la polarisation électrique de la barrière change la résistance par au moins deux ordres de grandeurs. La taille latérale des domaines dans les couches ultrafines (2nm) descend sous les 5 nm. La commutation sous quelques volts se fait en moins de 10 ns avec moins de 10 fJ. Des expériences originales en mode « piézo réponse », simultanément aux mesures de transport, ont permis de montrer la corrélation directe entre la proportion respective des domaines et la valeur de la résistance. La résistance finale dépend de l'amplitude de la tension appliquée, de la durée de l'impulsion, du nombre d'impulsions. Cela autorise le contrôle quasi-continu de l'état de résistance par application de trains d'impulsions. Cet effet cumulatif permet d'imiter le comportement des synapses. Les effets cumulatifs peuvent « se lire » comme un apprentissage « STDP » (Spike Timing Dependent Plasticity).

Les rapports OFF/ON supérieurs à 100, proche de 1000, commutation rapide et caractère purement électronique (endurance illimitée) font du memristor un objet envisageable dans des réseaux matriciels ultradenses de grande échelle.

Enfin la versatilité du transfert de spin permet de réaliser des fonctions complexes à l'échelle nanométrique.



### Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Le programme ERC de recherches, au cœur de cette opération transverse, cible les réseaux matriciels de neurones et synapses artificiels basés sur des nanocomposants fonctionnels, et les architectures neuromorphiques (où un memristor sera un nano-synapse artificielle) visent :

- rapidité ;
- faible consommation énergétique ;
- tolérance aux défauts ;
- haute performance ;
- redondance ;
- plasticité synaptique, règle d'apprentissage.

Le programme de recherche se prolonge dans un projet de GDR (Groupement de Recherche ; CNRS) interdisciplinaire BioComp et s'insère dans le champ des sections 3, 6, 7, 8, 15, 24, 26 du CNRS.

Les collaborations, par essence pointues dans ce domaine très nouveau, sont établies avec le groupe de S.Yuasa (AIST Japon), de Neil Mathur (Université de Cambridge) du groupe Science et Technologie de l'Information (Thales-TRT), d'O. Teman (INRIA-Saclay), D. Querlioz (IEF), le groupe de S.Saighi (IMS Bordeaux), le groupe de P.Bessière et J Droulez (LPPA- Collège de France).

### Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Cette nouvelle approche vient en complément des processeurs séquentiels pour accélérer certaines fonctions clés. Les domaines d'application immédiats sont la reconnaissance et la classification de donnée.

### Conclusion

#### ▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

Cette opération transverse est d'une très grande originalité et attire des collaborations Thales TRT dans le domaine des algorithmes et de l'INRIA

#### ▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

Un risque évident découle de la richesse même du concept. Mais l'aventure est si belle que la route ne sera pas seulement contrariée par des difficultés, elle apportera tellement de questions nouvelles et de réponses loin de l'imagination actuelle la plus fertile que le futur est rayonnant et particulièrement enthousiasmant.



## Thème 5 :

Opération de recherche transverse : Systèmes hybrides supraconducteurs/ferroïques

## Nom du responsable :

M. Javier VILLEGAS

## Effectifs

- Effectif permanent impliqué : ~ 2 ETP
- 1 thèse soutenue (commune avec thème « Oxydes ») et 1 thèse en cours/2 post-doc
- 5 articles réguliers RICL/ 3 mémoires d'invention
- 16 conférences invitées
- 2 contrats CE et 1 contrat ANR jeune chercheur
- 2 brevets déposés

## • Appréciations détaillées

### Appréciation sur la production et la qualité scientifiques

L'opération de recherche « Systèmes hybrides supraconducteurs/ferroïques » a été créée, à l'occasion du mandat en cours d'évaluation, autour du projet jeune chercheur d'un membre du thème « Supraconducteurs HTC et traitement du signal ».

Cet axe nouveau s'appuie clairement sur les compétences et les connaissances acquises sur les cuprates supraconducteurs, singulièrement YBaCuO qui est le matériau supraconducteur le mieux maîtrisé technologiquement et le plus prometteur en termes d'applications. L'opération de recherche transverse s'est construite en collaboration avec le thème « Oxydes fonctionnels », collaboration matérialisée par le co-encadrement d'une thèse en 2012.

Se distinguant du thème supraconducteur sous différents aspects développés ci-dessous, l'opération de recherche transverse comprend deux directions de recherche qui exploitent respectivement les effets de champ (magnétique et électrique) et les effets de proximité proprement dits (comme la supraconductivité polarisée en spin) inhérents aux matériaux hybrides.

Si la première, plus classique, offre des perspectives d'applications (deux brevets déposés), la seconde est plus en rupture, c'est une approche fondamentale où il convient de mettre en évidence des effets nouveaux et de les caractériser en détail. Le second aspect concerne les technologies et les collaborations mises en œuvre qui sont nouvelles : on part d'une technologie planaire de films épais nanostructurés par irradiation d'ions oxygène vers des hétérostructures à transport vertical à travers des films supraconducteurs ultra-minces en passant par des films nanostructurés in situ par effet ferroïque.

Dans les structures verticales, la physique de l'anisotropie de l'état supraconducteur d'YBaCuO s'y manifeste de manière différente, les problèmes et les solutions technologiques et les questions de maturité technologique sont aussi eux-même différents. Le développement et la réalisation des hétérostructures hybrides ferro-supra sont réalisés en interne.

Les premiers résultats ont été remarquables ; ils ont été souvent publiés dans des revues à fort impact et chaque fois avec une grande visibilité (couverture de Nature Physics et support editorial de Physical Review Letters). Côté innovation, deux brevets ont été déposés, d'autres sont en cours.

Sans hésitation, ce nouveau thème de recherche se révèle une prise de greffe réussie, nous sommes confiants dans ses évolutions futures.



### Appréciation sur le rayonnement et l'attractivité académiques

Le projet a été très soutenu par les agences de financement locale (Triangle de la Physique), régionale (DIM), nationale (ANR) et européenne (Marie-Curie) et par ailleurs très bien évalué par le conseil de la recherche européen (ERC). La thèse soutenue en cours de mandat, fut distinguée par un prix en 2012, une seconde thèse est en cours. L'activité, qui a attiré successivement deux post-doctorants, monte en puissance. Concernant les activités éditoriale, de pilotage de réseau, et d'organisation de conférences, le critère ne peut encore s'appliquer à cette jeune équipe. La première étape à franchir rapidement pour la visibilité académique de l'activité est l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches de ses membres, les autres suivront naturellement.

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

L'opération transverse met en jeu des technologies nanoélectroniques hybrides inédites et présente de ce fait un fort potentiel d'innovation. L'environnement socio-économique de la tutelle Thales y est très favorable et deux brevets ont d'ores et déjà été déposés, alors que d'autres sont en cours de dépôt.

Nous n'avons pas trouvé d'exemple de valorisation externe, ce qui est encore prématuré, mais peut être envisagé dans le futur en complément des possibilités de développements en interne de Thalès. Les activités de nature fondamentale et appliquée évoluent sur des constantes de temps très différentes et se fertilisent mutuellement ; cette opération transverse est un exemple de recherche fondamentale qui a pu germer sur une activité de supraconductivité plus appliquée et qui offre elle-même de nouvelles perspectives en terme d'innovation. Cette approche, alliant réactivité aux thématiques émergentes et persévérance dans les efforts technologiques, est une des clés de la réussite de l'unité.

### Appréciation sur la stratégie et le projet à cinq ans

Le projet résulte de la richesse des résultats récents obtenus sur l'injection de supercourant polarisé en spin dans les ferromagnétiques et la modulation de la supraconductivité par effet de champ ferroélectrique. Le premier objectif est ambitieux, il vise la réalisation de dispositifs spintronique supraconducteurs. Le second est plus prospectif et vise l'investigation de jonction Josephson dans un supraconducteur soumis à un fort champ électrique. La méthode de dopage ferroélectrique pourrait aussi simplement être utilisée pour l'étude de la supraconductivité des cuprates dans des régimes (sous dopés) où le dopage chimique est difficilement contrôlable. Enfin une troisième direction de recherche est proposée qui concerne les structures hybrides supraconducteur HTS graphène qui offrent des perspectives prometteuses notamment en terme d'applications.

### Conclusion

#### ▪ *Points forts et possibilités liées au contexte :*

L'opération transverse systèmes hybrides supraconducteurs est très originale et ambitieuse. Une des clés de la réussite réside dans la capacité à intégrer deux technologies exigeantes, celle des ferriques et celle des cuprates supraconducteurs, de manière à réaliser des hétérostructures où les effets intrinsèques dominent. L'autre point fort est le dynamisme de la jeune équipe porteuse du projet.

#### ▪ *Points faibles et risques liés au contexte :*

Un risque évident découle de la richesse même du concept de systèmes hybrides qui génère naturellement un foisonnement de situations physiques, de types de dispositifs et d'effets nouveaux à caractériser. Vu la taille actuelle de l'équipe le risque de dispersion des moyens humains existe et des priorités doivent être établies. Le projet mentionne la nécessité d'approfondir la compréhension des mécanismes observés, c'est une sage attitude qu'il convient d'encourager.

#### ▪ *Recommandations :*

L'orientation choisie de créer cette opération transverse sur les systèmes hybrides supraconducteurs est une réussite qui doit être amplifiée. Les projets sont légitimement ambitieux.



## Axe transverse 1

Matériaux et nanotechnologies

### Animateurs :

C. DERANLOT, E. JACQUET, R. BERNARD, C. CARRETERO, K. BOUZEHOUE.

L'axe transverse « Matériaux et nanotechnologies » regroupe les aspects expérimentaux avec la synthèse de nouveaux matériaux, le développement instrumental (champ proche, techniques de croissance) en réponse aux besoins soulevés par les thèmes de recherche. Cet axe comprenant 5 ITA permanents regroupe la microscopie et nano-fabrication champ proche, la croissance par pulvérisation cathodique et évaporation thermique, la croissance par ablation laser pulsé et les techniques de caractérisation microstructurales.

Cet axe n'est pas organisé en « plate-forme » de service expérimentale à part entière, comme c'est le cas dans beaucoup de laboratoires. Chaque membre de cet axe transverse, est complètement impliqué dans l'une des thématiques de recherche du laboratoire et ces ingénieurs et techniciens font partie intégrante des équipes dans une structure traditionnelle. Leur implication dans les problématiques scientifiques est donc très forte, et ils sont associés quasi-systématiquement aux publications. Cet axe transverse constitue donc un regroupement des expérimentateurs conduisant à un décloisonnement de leurs activités de recherche ce qui permet une synergie, un échange de compétences qui bénéficient à toutes les problématiques de recherche. Le comité d'experts a pu noter et apprécier un investissement et une implication forte de chacun dans sa thématique de recherche.

#### Techniques de dépôt :

Il est montré un développement important de nouvelles techniques de dépôts et une adaptation constante, avec une grande flexibilité, dans l'étude de la croissance de nouveaux systèmes qui a permis la réalisation de couches de grande qualité et de placer rapidement de nouveaux systèmes à l'état de l'art. On notera la réalisation des couches (Yttrium Ion Garnet) (YIG), avec une très faible constante d'amortissement de Gilbert ouvrant un champ d'activité, la Magnonique, avec un potentiel d'application important pour Thales notamment pour la réalisation de lignes à retards.

L'invention d'un procédé pour la synthèse d'alliages Au-Tungstène dont les applications sont nombreuses avec un projet de start-up, constitue une autre avancée remarquable de cet axe transverse (Equipe sputtering + dépôt d'un brevet en cours avec Thales Optronics, (TOSA)).

Dans le cadre de la spintronique à base de molécules, ils ont rendu possible l'intégration de semi-conducteur organique ou de barrière tunnel en utilisant des couches auto-assemblées avec, par exemple, la réalisation d'hétérostructures Co/Alq<sub>3</sub>/Co et l'obtention d'une GMR (Giant Magneto Resistance) à température ambiante ou la fabrication de nanojonctions tunnel magnétiques à base de SAMS (couches organiques auto-assemblées). Ceci a nécessité la mise au point d'un système de transfert sous atmosphère contrôlée entre les boîtes à gant, où le greffage de molécules est réalisé par immersion, et les systèmes de dépôt de métaux sous vide. L'adaptation des dispositifs de dépôt pour l'organique notamment en phase liquide avec des vannes d'injections rapides est actuellement en développement.

L'activité « microscopie et nano-fabrication champ proche » s'est considérablement développée ces dernières années offrant la possibilité d'ouvrir cette plate-forme vers les autres équipes de Thales. Ils se sont fortement spécialisés dans la microscopie en champ proche Conductive AFM (C-AFM), la visualisation de domaine magnétique en mode PFM (Pulse Frequency modulation) et l'écriture de domaine ferroélectrique. Le développement de la nano-indentation par AFM et les résines permettant la prise de contact local, constitue une avancée remarquable pour l'ensemble des thématiques de recherche puisqu'il permet de s'affranchir de la nécessité de réaliser des couches homogènes sur de grandes surfaces. C'est particulièrement important dans le cas des couches organiques avec les problèmes de mouillage des surfaces que soulève la réalisation d'une interface organique/inorganique.

L'aspect hétéro-structure à base de structure organique les pousse à développer les techniques champ-proche C-AFM en mode intermittent synchrone avec la phase contact dans ce mode.



On notera également une forte implication dans les collaborations externes, notamment sur le plateau de Saclay pour la caractérisation par microscopie électronique en transmission et l'implication de cette équipe dans le projet NANOTEM de l'EQUIPEX TEMPOS et la mise en commun au sein de la plate-forme technologique commune Thales-CNRS-IOPS (Institut d'Optique Graduate School)-École Polytechnique, d'un diffractomètre de rayons X acquis au laboratoire.

Cet axe transverse est un atout incontestable pour l'excellence de recherche de ce laboratoire. Malgré la complexité des systèmes abordés, ses cinq permanents font preuve d'une très grande flexibilité et adaptation aux problèmes posés par l'évolution des thématiques de recherche. Le succès récurrent du laboratoire dans les différents appels d'offres ouvre sans cesse l'éventail des structures et nouveaux systèmes à réaliser. Les permanents de cet axe sont certes très épaulés par les nombreux non-permanents (doctorant, post-doctorant) qui viennent gonfler leurs effectifs et qui réalisent un travail important, mais ils doivent garantir « la continuité » et permettre le passage de relais avec la transmission des nouvelles méthodes et technologies mises au point dans le cadre des différents projets. On ne peut que souhaiter que cette équipe puisse continuer à suivre le rythme imposé par la multiplicité des projets. Le récent renfort d'un IE (Ingénieur d'étude) en 2010 a été dans ce contexte extrêmement bénéfique. Il serait cependant souhaitable que cet axe puisse à nouveau bénéficier d'un support technique supplémentaire.



## Axe transverse 2

LIGA

Animateurs:

S. MEGTERT, F. BOUAMRANE

Le procédé LIGA (Lithography, Galvanoformung, Abformung, lithographie, électroformage et moulage), permet à la suite d'une lithographie profonde (RX), la réalisation de microstructures et de microsystèmes possédant des dimensions micrométriques à grand rapport de forme. Depuis la fermeture de LURE en 2003, ANKA (Karlsruhe), source de SR (Synchrotron radiation) en Allemagne a hébergé les réalisations et les avancées de cette équipe. C'est ensuite SOLEIL, avec l'installation sur la ligne « Métrologie et Tests » qui accueille cette activité. Cette station de lithographie X est ouverte aux projets de recherche académiques mais aussi industriels. L'UMPhy a signé en 2010 une convention de collaboration avec SOLEIL.

Trois thématiques principales ont à ce jour été identifiées :

Le domaine énergétique : la fabrication de laser de puissance, associant en phase, un grand nombre de fibres optiques monomodes amplificatrices. C'est un projet en partenariat avec Thales-TRT qui consiste à créer une matrice 8x8 de trous dans un film de PMMA d'un millimètre d'épaisseur pour accueillir 64 fibres avec une précision de 1  $\mu\text{m}$ , et un espacement entre fibres de 1,5 mm.

Un autre projet (NDA) avec l'ONERA-TRT.

Le domaine de l'imagerie : la technologie LIGA a permis de réaliser deux éléments clés du projet Européen (OPTHER, Optically driven terahertz amplifiers). (partenaires THALES (TRT et TED), CNRS (LPICM et UMP), DTU-GFU, UTV, SELEX-SI

Avec TRT-Thales, dans le cadre d'un programme de recherches de thèse portant sur la fabrication de détecteurs IR à base de GaInAs, la technique LIGA a été utilisée pour réaliser des test préliminaires de réplique localisée de nanofils de métal.

Et d'autres projets technologiques :

- senseurs de front d'onde Hartmann et Shack-Hartmann ;
- diagnostique de faisceau Synchrotron avec et pour SOLEIL ;
- antenne à balayage optique ;

Les masques pour les domaines des matériaux supraconducteurs, oxydes et spintronique.

Mieux comprendre l'écoulement des vortex en introduisant des défauts d'irradiation (ions lourds Pb56+) dans des géométries réalisées avec des masques (régions rectangulaires adjacentes, parois irradiées,..), mesure de polarisation de matériaux ferroléctriques.



## Futur

Cette activité est originale et très séduisante dès lors que, comme c'est le cas, elle est développée pour satisfaire des besoins identifiés. Elle reste très artisanale, ce qui est favorable pour l'écoute apportée aux demandes. Les ambitions germaniques, à une échelle trop large il y a plus de vingt ans, n'ont pas duré dans une entreprise spécialisée, restreinte à cette activité encore très amont.

Elle est ici à un carrefour. L'effectif a fondu, plus qu'un seul scientifique, et les motivations R&D ne peuvent se trouver au sein de Thales et de Soleil seulement.

L'ouverture aux autres industriels est encouragée, en particulier avec le canal du CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques) avec le concours des ingénieurs de TRT bien implantés. Une plaquette résumant les aspects et faits marquants, les possibilités du LIGA appuieraient cette stratégie.



## 5 • Déroulement de la visite

### Dates de la visite

Début : 13 janvier 2014 à 13h30

Fin : 15 janvier 2014 à 14h00

### Lieu de la visite

Institution : Thales TRT

Adresse : 1 avenue Augustin Fresnel, 91767 PALAISEAU

### Déroulement ou programme de visite

#### Lundi 13 janvier 2014

13h30-14h	Réunion du comité d'experts (huis clos)
14h00-14h45	Exposé du bilan 2008-2013 (M. Frédéric PETROFF - M. Frédéric NGUYEN VAN DAU)
14h45-18h45	Exposés scientifique <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamique d'aimantation par transfert de spin : vortex magnétiques, parois de domaines et autres skyrmions magnétiques (V. CROS)</li> <li>• Hétérostructures à base de BiFeO<sub>3</sub> pour l'électronique, la spintronique, la magnonique et la photonique (M. BIBES)</li> <li>• Démonstrateurs en électronique supraconductrice (B. MARCILHAC)</li> <li>• Activité LIGA (F. BOUAMRANE)</li> </ul> <p>Pause</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spintronique avec graphène (P. SENEOR)</li> <li>• Electro-résistance géante dans les jonctions tunnel ferroélectriques (V. GARCIA)</li> <li>• Nanoélectronique supraconductrice (J. BRIATICO)</li> </ul>
19h00-19h30	Réunion du comité d'experts (huis clos)

#### Mardi 14 janvier 2014

9h00-10h30	Exposés scientifiques <ul style="list-style-type: none"> <li>• Spintronique avec semi-conducteurs (J.-M. GEORGE)</li> <li>• Nano-composants multifonctionnels pour le traitement cognitif de l'information (J. GROLLIER)</li> <li>• Hybrides supraconducteurs/ferroïques (J. VILLEGAS)</li> </ul>
10h30-11h00	Pause et transfert vers les locaux de l'unité



11h00-12h15	Visite et présentation des activités "Matériaux et Nanotechnologies"
12h15-16h00	Buffet - Séance posters (liste en annexe)
16h00-18h30	Rencontres comité d'experts avec le conseil de labo et tutelles
• 16h00-16h30	Représentants ITA
• 16h30-17h00	Représentants non permanents (doctorants, post-docs)
• 17h00-17h30	Représentants chercheurs et enseignants-chercheurs
• 17h30-18h00	Directeurs des écoles doctorales
• 18h00-18h45	Rencontre avec les tutelles
18h45-19h30	Réunion du comité d'experts (huis clos)

### Mercredi 15 janvier 2014

9h00-9h45	Exposé du projet 2015-2019 (M. Frédéric NGUYEN VAN DAU - M. Frédéric PETROFF) Entretien avec l'équipe de direction (session restreinte)
10h30-11h	Pause
11h - 14h	Réunion du comité d'experts (huis clos).

### Points particuliers à mentionner

La visite s'est déroulée dans d'excellentes conditions, avec une préparation très soignée du directeur, du directeur-adjoint et du personnel du laboratoire dans son ensemble, tous très professionnels. Les documents écrits sont d'excellentes factures, d'une lecture facile. Les présentations orales furent concises et bien adaptées au temps imparti à chaque séquence. La qualité des rapports écrits et de la préparation des présentations ont donné au comité d'experts les meilleures conditions pour réaliser le travail d'évaluation.

Toutes les présentations portaient la preuve d'une perception très pertinente de l'originalité scientifique et de l'approche stratégique de l'UMPhy sans égales en France. Les axes de recherches de l'UMPhy croise très nettement des domaines que privilégie Thales. Cette fertilisation croisée est sans doute plus marquée que précédemment. Très productifs au meilleur niveau international sur leurs thèmes dominants, les personnels de l'UMPhy, sont particulièrement soudés et efficaces.

Ainsi, ils sont très visibles sur des programmes très concurrentiels de la recherche scientifique la plus en pointe.

Le comité d'experts a été sensible et très impressionné par la mobilisation globale du personnel, soucieux de délivrer un message cohérent aux experts du comité, au contenu ciblé sur l'évaluation, dans une atmosphère d'hospitalité et de cordialité très appréciées : l'accueil fut chaleureux et de qualité.

La présentation initiale par le directeur adjoint a démontré la qualité des choix et des résultats scientifiques, l'efficacité de l'organisation, la haute valeur ajoutée apportée par l'approche dans l'« environnement Thales ». Les indicateurs habituels de production scientifique, élaborés avec des critères pertinents pour une lecture internationale ont permis l'approche quantitative complémentaire.

La présentation des ressources, humaines, financières (ANR, EQUIPEX et ERC, DIM IdF, contrats,...opération Idex et Plateau de Saclay) et autres (l'accès et/ou le développement d'infrastructures mutualisées locales, nationales, SOLEIL en particulier, ou européennes) fut faite en l'éclairant par le contexte local et le contexte national.



L'ordre du jour de ces journées était cohérent avec la structuration thématique du laboratoire qui identifie trois thèmes portant chacun 2 ou 3 opérations de recherche :

- spintronique et Nanomagnétisme ;
- oxydes fonctionnels ;
- supraconducteurs hautes T<sub>c</sub> et traitement du signal ;

qui sont en appui de deux opérations transverses, nouvelles, porteuses d'une saisissante créativité scientifique :

- traitement cognitif de l'information ;
- systèmes hybrides supras /ferroïques.

Ces cinq items recevant le soutien de l'axe transverse technologique « Matériaux et Nanotechnologies » et avec un poids moindre l'axe transverse « Microfabrication avec le rayonnement synchrotron (LIGA) ».

Les deux opérations transverses font émerger deux jeunes équipes.

Le « Traitement cognitif de l'information », et les « Systèmes hybrides supra/ferroïques », de nature différente, s'appuient sur les recherches menées dans les trois grands thèmes de recherche de l'UMPhy. Ils ont été identifiés comme des opérations de recherche transverses, améliorant ainsi la communication entre les différents thèmes et facilitant la lisibilité de l'organisation des études de l'UMPhy.

La vision prospective 2015-2019, très clairement construite, présentée avec brio et recul approprié, consolide les inflexions données à la politique scientifique de l'UMPhy durant le mandat qui vient de s'écouler.



## 6 • Observations générales des tutelles

En dépit des sollicitations de l'AERES, aucune observation ne lui est parvenue au jour de la publication de cette évaluation.