

## I - Présentation de l'équipe

### Introduction :

Le groupe MEM a été fondé en 2016 par des membres des composantes « électronique » et « magnétisme » de l'ancien groupe Nanomatériaux. Il s'appuie sur différentes thématiques couvrant un large spectre d'activités, de la synthèse de matériaux nouveaux à la compréhension de leurs propriétés, grâce à des mesures expérimentales et des calculs numériques. Au cours des deux dernières années, nous avons développé de nouvelles associations des compétences disponibles au sein du groupe, couplant par exemple calcul numérique et expérience sur les alliages GST, ou implantation ionique, analyse des propriétés magnétiques et calculs sur les alliages d'Heusler. Nos recherches se sont principalement appuyées sur les outils suivants : bâti de pulvérisation cathodique et implantateur d'ions à basse énergie, techniques de microscopie électronique en transmission (HREM, EELS, HAADF, DFEH), XRD, mesures magnétiques statiques et dynamiques (PPMS, FMR), codes pour le calcul des propriétés physiques à diverses échelles, supercalculateurs local (CALMIP) ou nationaux, ainsi que FTIR, Raman, XPS et TOF-SIMS via des collaborations internes ou externes.

### Effectifs et moyens :

Le groupe MEM comporte 8 permanents : 7 CNRS et un enseignant-chercheur UPS. Sur la période, il a encadré ou encadre 21 thèses (5 en cours), dont 8 bourses Cifre (3 en cours) et a accueilli 7 postdocs. Le devenir et l'insertion professionnelle des thésards et postdocs est l'une des préoccupations majeures et un réel succès du groupe (54% ingénieurs STM/Soitec/CEA, 31% Post-docs).

Membres permanents		Doctorants	
Lionel CALMELS (Resp.)	PR1	Bilel SAIDI (codir. CEA, 50%)	Cifre STM, 2011-2014
Rémi ARRAS	CRCN	Victor BOUREAU	Cifre STM, 2013-2016
Jean-François BOBO	DR2	Aurore BONNEVIALLE	Cifre STM, 2014-2017
Gérard BENASSAYAG	DR2	Rémy BERTHELON	Cifre STM, 2015-2018
Nicolas BIZIERE	CRCN	Clément GAY	Cifre STM, 2018-2021
Nikolay CHERKASHIN	CRCN	Pablo ACCOSTA ALBA	Cifre Soitec, 2012-2014
Alain CLAVERIE	DRCE	Antonin LOUISET	Cifre Soitec, 2018-2021
Sylvie SCHAMM-CHARDON	DR2	Jérémie ROI	Cifre Soitec, 2018-2021
Post-docs		François-Xavier DARRAS	MESR, 2011-2015
Maxim KORYTOV	2013-2016	Lama YAACOUB (codir. M3, 40%)	MESR, 2011-2014
François-Xavier DARRAS	2015	Lucie MAZET (codir. INL, 40%)	MESR, 2012-2016
Nabil DAGHBOUJ	2016	Barthélémy PRADINES	MESR, 2014-2017
Marta AGATI	2017-2018	Assia HAJ SALEM (codir. NEO, 50%)	MESR 2012-2018
Maxime VALLET	2018	Julien GOSTEAU	MESR, 2018-2021
Rajarshi SINHA-ROY	2018-2019	Aurélien ROYAL	CEA/CNRS, 2014-2017
Hilal BALOUT	2019	Tristan DEWOLF (codir. CEA, 50%)	CEA/CNRS, 2014-2018
CDD		Iman ABDALLAH	ANR, 2013-2016
Adrien BOURGINE (AI/IE)	2018-2019	Thomas GARANDEL (codir. LPCNO, 50%)	Région/COMUE, 2014-2017
		Hugo RAGAZZO	ONERA, 2017-2020
		A. BELAHAIFI (Univ. Rabat)	PAI Volubis, 2011-2014
		Nabil DAGHBOUJ(codir Univ Monastir50%)	Tunisie, 2012-2016

Sur la période 2014-2019 (5 ans), nos moyens financiers se sont élevés à environ 400k€/an avec :

- 80 k€ pour le point chercheur ;
- 1100 k€ pour les financements sur projet (EU-FP7, ANR, LABEX-NEXT, ...) incluant des salaires ;

- environ 800 k€ de salaires de doctorants non pris en compte ci-dessus : environ 3,7 thèses cifre, 1,7 thèses MESR et 3,2 thèses d'autres origines (financement CEA, Tunisie, région MP/COMUE, ONERA).

### Politique scientifique :

Les recherches menées par le groupe MEM portent sur les matériaux et dispositifs pour l'électronique/l'opto-électronique et le magnétisme/la spintronique. Elles se déclinent en trois thématiques principales :

- La thématique « **Matériaux semiconducteurs pour la microélectronique** » a pour objectif d'observer, quantifier, comprendre et modéliser de nouveaux procédés, de nouvelles structures et de nouveaux matériaux utilisés pour fabriquer les briques de base de la microélectronique ultime. Cette thématique est centrée sur des problématiques de science des matériaux. Entretien depuis longtemps des collaborations avec les acteurs majeurs du domaine (centres de recherche appliquée, fondeurs et équipementiers), nous coordonnons ou participons à des aventures technologiques, soutenus par des contrats nationaux (ANR), européens mais surtout industriels. Cette thématique correspond à  $\sim 3/8$  du temps de recherche des permanents du groupe.

- La thématique « **Oxydes fonctionnels pour l'électronique et la spintronique** » a pour objectifs d'analyser, comprendre et prédire les propriétés physiques d'oxydes fonctionnels ou d'interfaces d'oxydes. Ces propriétés pourraient être mises à profit dans des dispositifs originaux, tirant partie de la grande richesse et diversité de comportements offertes par cette famille de matériaux. Elles pourraient être manipulées et ajustées par une ingénierie fine de leur structure atomique. Cette thématique correspond à  $\sim 2/8$  du temps de recherche des permanents du groupe.

- La thématique « **Matériaux pour le magnétisme et la spintronique** » vise à imaginer puis concevoir des matériaux, en couches minces ou de plus faible dimension, à comprendre les propriétés magnétiques statiques et dynamiques de ces matériaux puis à utiliser et ajuster ces propriétés originales pour les mettre à profit dans des composants innovants pour la spintronique. Cette thématique correspond à  $\sim 3/8$  du temps de recherche des permanents du groupe.

Le groupe MEM est également impliqué dans 5 des 10 opérations transverses du CEMES.

## II - Produits de la recherche et activités de recherche

**Bilan scientifique et faits marquants** (présentés dans des encadrés) :

### A) Matériaux semiconducteurs pour la microélectronique

- **Ingénierie des contraintes et FD-SOI (collaboration STMicroelectronics, CEA/LETI) :**

Des contraintes adéquates appliquées à des couches semiconductrices permettent d'augmenter sensiblement la mobilité des porteurs par rapport au matériau massif, ce qui améliore les performances des composants. Dans ce contexte, nous avons piloté une opération, financée par un contrat de recherche et 3 contrats Cifre avec STMicroelectronics, réalisée sur les sites CEMES, Lét/CEA et STMicroelectronics, visant à :

- comprendre l'existant : Impact des étapes technologiques sur l'état de contrainte du canal (Thèse Boureau, 2016) [16, 62],
- proposer des solutions innovantes : « Smart » Ingénierie des contraintes (Thèse Bonneville, 2016) [61],
- intégrer : mise à l'échelle et effets de design (Thèse Berthelon, 2018) [84],

des solutions technologiques permettant la mise en tension ou en compression du canal en Si, Ge ou SiGe, de transistors MOS au nœud 24 nm et en deçà.

## Recherche Amont pour l'industrie de la microélectronique - When beauty meets utility

L'expertise reconnue du groupe MEM en science des matériaux lui a permis de tisser des liens solides avec les deux acteurs majeurs de la microélectronique que sont STMicroelectronics et Soitec. Ces liens se traduisent par des contrats récurrents et l'embauche régulière de nos anciens doctorants. Dans ce cadre, le groupe a accompagné ces deux acteurs au cours de l'aventure « FD-SOI » qui a vu Soitec commercialiser des wafers de SOI ultra-fins et STMicroelectronics, les utiliser pour sa technologie FDSOI 28 nm. De 2014 à 2019, 6 thèses Cifre ont été lancées et 4 de nos anciens thésards embauchés. Ces collaborations ont généré plus de 700 k€ et ont fait l'objet d'une quinzaine de publications ainsi que d'une dizaine de conférences invitées. En 2019, le groupe a consolidé son partenariat avec Soitec via la signature de 2 contrats de collaboration de recherche. MEM est l'un des 8 partenaires académiques (le seul dépendant de l'INP/CNRS) retenus au sein du plan européen IPCEI sur la nano-électronique (2019-2024). Dans ce cadre, notre contribution se focalisera sur les alliages GeSbTe utilisés pour la fabrication des mémoires « PCM ».



Les laboratoires et universités partenaires de Soitec.  
Le CEMES en bonne compagnie.

<https://www.soitec.com/fr/entreprise/partenaires>

### ▪ Complexes et défauts dans le silicium implanté : la Physique derrière le procédé Smart Cut (collaboration SOITEC, CEA-INAC, CEA-Leti) :

Ce travail a porté sur la compréhension et la modélisation des mécanismes physiques intervenant à la suite de l'implantation ionique d'hydrogène et d'hélium dans le Silicium et pendant un recuit thermique. La précipitation d'impuretés gazeuses ayant alors lieu dans le cristal est à la base du procédé Smart-Cut® utilisé par la société Soitec pour la fabrication des substrats SOI qui habitent tous nos smartphones. Cette précipitation met en jeu des défauts complexes contenant quelques atomes, des platelets nanométriques, des cloques et fissures micro et millimétriques qui se transforment en cours de recuit. Certains de ces travaux ont été effectués dans le cadre de contrats de collaboration de recherche ou de bourses Cifre, notamment sur les thèmes suivants :

- Défauts avant recuit, complexes lacunaires (Thèse Darras, 2015) [5,28] : expérience (FTIR, Raman) et théorie ;
- Orientation des platelets, variants et contrainte (Thèse Darras, 2015) [63] : expérience (TEM) et modèle analytique ;
- Cloques et fissures, pression du gaz (Thèse Daghbouj, 2016) [48, 90] : expérience (TEM) et modélisation FEM ;
- Effet synergique de la co-implantation (Thèse Daghbouj, 2016) [17, 65, 90].

### ▪ Les alliages GeSbTe (GST) pour mémoires à changement de phase (collaboration STMicroelectronics, LPCNO) :

Les alliages GST, tels que  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , présentent de fortes variations de résistivité en fonction de leur structure, amorphe ou cristal, manipulable localement par traitement thermique. Ceux enrichis en Ge sont envisagés par STMicroelectronics pour être utilisés dans les dispositifs PCM au nœud 28 nm et en-dessous. En vue d'étudier la corrélation entre la structure atomique locale et la conductivité électrique du GST, nous avons bâti un large projet associant les compétences du groupe (RX, MET, DFT) en propriétés structurales et électroniques et une équipe du LPCNO spécialiste du transport électronique dans les nanostructures.

– nos résultats expérimentaux ont permis de comprendre les caractéristiques électriques observées et remettent en cause une vision répandue, selon laquelle la composition chimique de l'alliage amorphe déposé change la température de cristallisation : Il ne s'agit pas d'une modification « thermodynamique » mais d'une limitation cinétique [15].

– nos calculs ab-initio ont permis de calculer la dispersion des états électroniques et la conductivité électrique de la phase cristalline de composés GST en fonction de leur composition [21].

Développé en collaboration avec STMicroelectronics, ce projet a été soutenu par un contrat industriel et un contrat du Labex NEXT. STMicroelectronics nous a octroyé une première bourse Cifre et nous a intégrés en tant que partenaires du projet IPCEI sur la microélectronique ultime pour développer plus encore ce sujet.

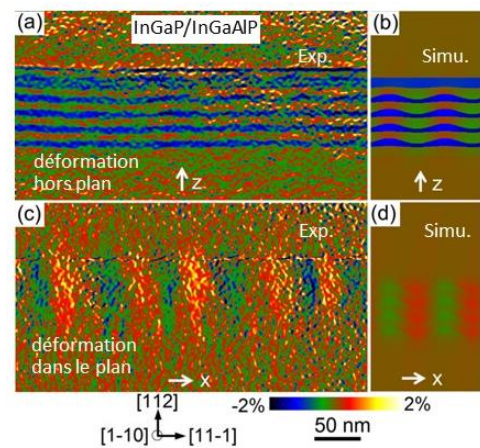
#### ▪ Nanostructures III-V pour l'opto-électronique

Nous avons étudié les corrélations entre structure, morphologie et propriétés électriques/optiques des dispositifs luminescents suivants :

– Milieu actif des diodes et lasers à base de boîtes quantiques (EU-FP7 NEWLED)[12, 18, 35, 56, 57, 69, 72, 73, 77, 78, 81, 102, 103]: nous avons développé un protocole pour déterminer la composition en indium avec une précision de 1% et une résolution spatiale de 0.3-2 nm dans des couches d'InGaP/GaN et d'InGaP/InGaAlP épitaxiées sur divers substrats (substrats polaires et semi-polaires GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, substrats GaAs à hauts indices). Nous avons détecté la formation de boîtes quantiques et corrélé les propriétés structurales et électro-optiques.

#### Mesures de déformations pour tous

Notre analyse des mécanismes mis en jeu lors du « process » de matériaux s'appuie en partie sur la mesure de déformations cristallines. Fervents utilisateurs de l'I2TEM et de méthodes GPA, nous avons souhaité libérer ces techniques de leurs plus sévères limitations : Les techniques MET récentes, qui demandent des combinaisons toujours plus complexes de lentilles, diaphragmes, prismes et détecteurs, sont mises en œuvre sur des microscopes que la plupart des laboratoires publics et privés ne pourront s'offrir. Nous avons donc mis au point une méthode de préparation d'échantillons à « doubles lames » dont la géométrie permet la formation de moirés contrôlés et la mesure des champs de déformation avec une très grande sensibilité, une résolution spatiale nanométrique et un très grand champ de vue, tout en utilisant un MET conventionnel (méthode « MoSD », Moiré par le Design d'échantillons) [12,18]. De plus, souvent confrontés au besoin de mesurer des déformations alors qu'un réseau cristallin de référence n'est pas présent dans l'image, nous avons inventé et mis au point une nouvelle méthode de traitement d'images (méthode « AbStrain »), permettant la mesure absolue des distances et des angles interplanaires dans des images en HREM de structures cristallines [96, 97].



– Îlots de grande dimension de Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As sur substrats de Si, pour cellules solaires multispectrales (ANR Multisosi) [40, 71, 89]: nous avons détecté la structure interne de ces îlots présentant un fort désaccord paramétrique avec le substrat et proposé un mode de croissance permettant d'éviter la formation de défauts dans ces îlots, ce qui améliore considérablement leurs propriétés optiques.

#### B) Oxydes fonctionnels pour l'électronique et la spintronique :

Les oxydes fonctionnels permettent d'envisager un spectre large de composants à basse consommation d'énergie pour les futures technologies de l'information : mémoires résistives (OxRRAM), transistors à effet de champ ferroélectriques (FeFET), dispositifs basés sur le gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) pouvant apparaître aux interfaces de deux oxydes isolants, mémoires magnétiques à base multiferroïques avec couplage magnétoélectrique. Ces actions sont corrélées au GDR OXYFUN (Oxydes Fonctionnels : du matériau aux dispositifs) dont un membre du groupe fait partie du bureau. 5 thématiques ont notamment été développées.

▪ Modulation du travail de sortie (EWF) du métal de grille TiAlN<sub>x</sub> sur HfO<sub>2</sub> pour une intégration à bas budget thermique du futur CMOS 20-14 nm (Thèse Saidi, 2014) [50] : sa mesure a été obtenue par corrélation

entre la distribution spatiale des éléments à l'échelle nanométrique et les paramètres électriques mesurés.

- **Compréhension des mécanismes de commutation dans les mémoires résistives à base de HfO<sub>2</sub> (Thèse Dewolf, 2018) [actes congrès 3]** : cette commutation est due à la formation/dissolution d'un filament conducteur nanométrique dont la nature (présence d'atomes métalliques issus de l'électrode et déplétion en oxygène) a été déterminée par cartographie chimique.
- **Intégration par MBE de BaTiO<sub>3</sub> sur Si et Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> et ferroélectricité à l'échelle nanométrique sur semiconducteurs (Thèse Mazet, 2016 ; ANR INTENSE) [6, 36, 74]** : nous avons corrélié l'orientation de la polarisation du ferroélectrique à sa composition cationique en fonction de la pression en oxygène.
- **Etude, par calculs ab-initio, du gaz bidimensionnel d'électrons aux interfaces d'oxydes polaires isolants (Thèse Gosteau en cours, projet LABEX-NEXT ELICO) [2, 82, 94]** : interfaces de structure perovskite ou spinelle, effet Rashba à ces interfaces, polarisation en spin du gaz d'électrons bidimensionnel.
- **Etude, par calculs ab-initio, de multiferroïques extrinsèques (collaboration IPCMS, Strasbourg) [9]** : association d'un matériau ferroélectrique et d'un matériau ferromagnétique et couplage magnétoélectrique aux interfaces, nature chimique de ce couplage.

### C) Matériaux pour le magnétisme et la spintronique

Les matériaux et nanomatériaux magnétiques permettent d'envisager des applications originales dans les domaines des capteurs magnétiques, du stockage et de la propagation de l'information. Ils permettent également de concevoir des dispositifs dont la consommation d'énergie particulièrement faible, lorsque ces dispositifs sont basés sur la manipulation d'un courant de spin plutôt que d'un courant de charge.

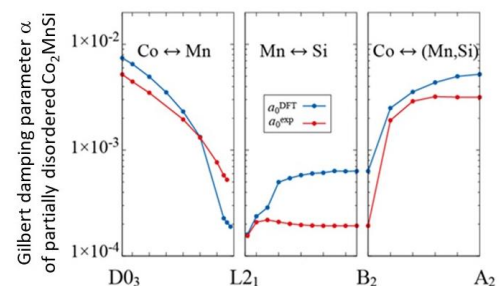
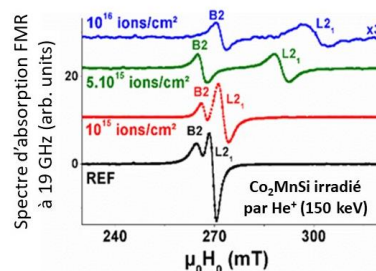
- **Nanomagnétisme de nano-cylindres (collaboration I3EM-CEMES, LSI-Palaiseau) :**

Prometteuses pour augmenter les densités de stockage des mémoires, nous avons travaillé sur les états magnétiques de systèmes modèles que sont des multicouches nano-cylindriques de Co/Cu électro-déposées. Grâce à une approche originale de type reverse engineering couplant expériences d'holographie magnétique, analyses EFTEM et simulation micromagnétique OOMMF, nous avons, en particulier, montré qu'il est possible d'avoir un système présentant deux états magnétiques stables contrôlés par application d'un champ magnétique externe. Ce type de structure permet, par exemple, d'envisager des nano-oscillateurs à transfert de spins avec deux fréquences de fonctionnement distinctes [8].

- **Alliages d'Heusler pour la spintronique (Thèses Abdallah, 2016 ; thèse Pradines 2017 ; ANR NASSICS ; projet LABEX-NEXT HEUMAC) [10, 14, 59, 76, actes congrès 2] :**

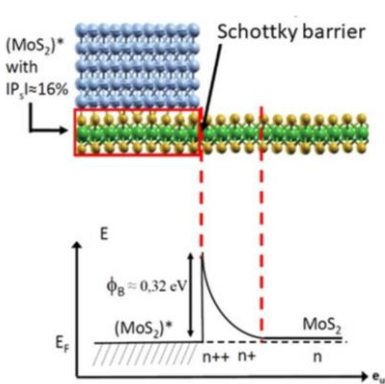
#### Vers un contrôle des propriétés magnétiques par ajustement du désordre

L'alliage d'Heusler Co<sub>2</sub>MnSi est un matériau de choix pour des applications telles que les dispositifs hyperfréquence, les vannes de spin ou les jonctions tunnel magnétiques. Cependant ses propriétés exceptionnelles (demi-metallicité et très faible coefficient d'amortissement de Gilbert  $\alpha \sim 10^{-4}$ ) sont rarement observées expérimentalement. L'idée originale de notre groupe a consisté à utiliser l'irradiation ionique pour induire différents types de désordre atomique et de corréler ce désordre aux paramètres magnétiques statiques déterminés par résonance ferromagnétique. Ainsi, en combinant nos expertises expérimentales (croissance par sputtering, modification par irradiation ionique, MET, magnétométrie, FMR) et numérique (calculs DFT), nous avons montré qu'il serait technologiquement avantageux de favoriser la synthèse de cet alliage dans l'ordre B2, plus simple à transférer dans des procédés de microélectronique et pouvant être stabilisé par irradiation ionique.



- Interfaces pour l'injection de spin dans les feuillets de dichalcogénures de métaux de transition (Thèse Garandel, 2017) [13, 75, actes congrès 1] :

**La physique quantique pour concevoir les composants spintroniques du futur**



MoS<sub>2</sub> et WSe<sub>2</sub> sont des cristaux de van der Waals aux propriétés remarquables. Leurs mono-feuillets sont des semiconducteurs à gap direct que de nombreuses équipes aimeraient utiliser comme partie active de composants spintroniques. Il faut, pour cela, être capable d'y injecter un gaz d'électrons polarisé en spin. Si l'injection optique de spins dans ces systèmes est bien maîtrisée, leur injection électrique, indispensable pour obtenir un composant spintronique, est un champ d'étude à découvrir. De même, si la physique de l'injection de spin dans un semiconducteur 3D est bien connue, qu'en est-il de celle dans un semiconducteur 2D ? Nos calculs *ab initio* des interfaces Co/MoS<sub>2</sub> et Ni/WSe<sub>2</sub> ont montré que l'injection de spin pourrait avoir lieu au travers de la barrière Schottky qui se forme au bord du contact ferromagnétique.

- Electromagnetic Visible Light Imaging (Thèse Ragazzo, en cours ; collab. LPCNO et ONERA) [20, 104]:

Le projet LABEX NEXT IVIBECA (2015-2018) a permis de proposer une technique alternative à la thermographie infra-rouge des champs électrique et magnétique hyperfréquence de matériaux magnétiques développée il y a 20 ans à l'ONERA (brevet ONERA EMIR), en tirant profit de la thermofluorescence ce qui permet de s'affranchir de l'emploi coûteux d'une caméra infra-rouge et son optique. Cette technique, que nous avons nommée EMVI (ElectroMagnetic Visible Imaging), est en cours de développement dans notre équipe, avec le soutien de la Mission d'Interdisciplinarité du CNRS qui nous a accordé un financement en 2018.

- Spintronique organique, magnétoélectroluminescence (collaboration LAAS) :

Nous avons étudié les effets magnétorésistifs OMAR (Organic Magnetoresistance) dans des couches minces de semiconducteur organique (OSC) de type OLED (diode électroluminescente organique) sans électrodes magnétiques. Nous nous sommes intéressés à des structures OLED de type EXCIPILEX. Les résultats montrent jusqu'à 10% de magnétoconductance et 16% de magnéto-électroluminescence [99].

Journaux / Revues	Articles Scientifiques	104
Colloques / congrès, séminaires de recherche	Articles publiés dans des actes de colloques / congrès	3
	Autres produits présentés dans des colloques / congrès et des séminaires de recherche	-
Interaction avec les acteurs socio-économiques	Contrats R&D avec des industriels	4
	Bourses CIFRE	8
Contrats de recherche financés par des institutions publiques	Contrats Européens, et internationaux	1
	Contrats nationaux (ANR, PHRC, FUI, INCA, LABEX...)	4
	Contrats avec les collectivités territoriales	1
	Contrats financés dans le cadre du PIA	6