

CRYstallised SrTiO₃ barrier for ultra low RA magnetic tunnel junctions CRYSTO



M. Cartier, E. Hassen, M-C. Cyrille, B. Viala – CEA GRENoble / DRT / LETI – Coordinateur
M. Chshiev, B. Belhadji, H.X. Yang – CEA GRENoble / DSM / SPINTEC
A. Barthélémy, C. Daumont, M. Bibès – UMR CNRS THALES
L. Prejbeanu, C. Ducruet, J. Vidal, J. Pereira – CROCUS TECHNOLOGY



Journées Nationales Nanosciences et
Nanotechnologies 2012

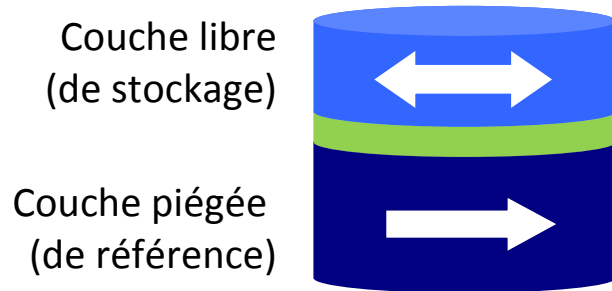
Sommaire

- Contexte & Motivations
- Organisation du projet
- Modélisation des propriétés de transport dans SrTiO₃
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par PLD & PVD
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par IBD
- Intégration de jonctions à base de SrTiO₃
- Indicateurs d'impact
- Conclusion & Perspectives

Sommaire

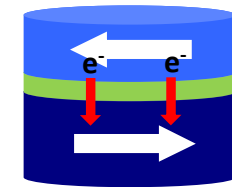
- **Contexte & Motivations**
- Organisation du projet
- Modélisation des propriétés de transport dans SrTiO₃
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par PLD & PVD
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par IBD
- Intégration de jonctions à base de SrTiO₃
- Indicateurs d'impact
- Conclusion & Perspectives

Jonction Tunnel Magnétique (JTM)



Barrière tunnel

Etat
ANTIPARALLÈLE
→ Résistance élevée

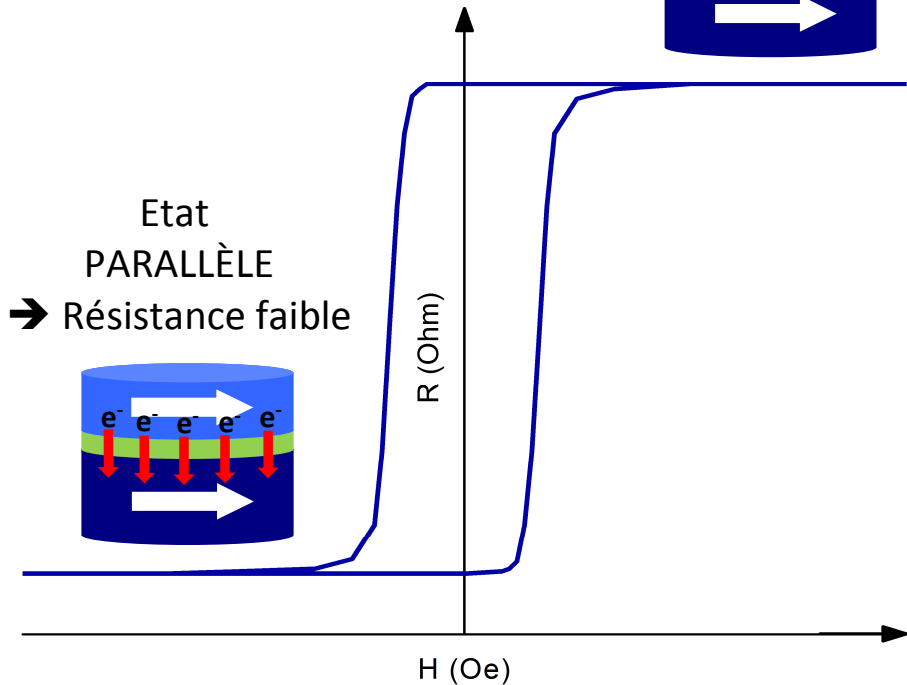
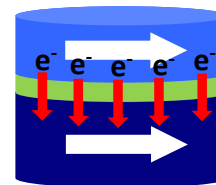


- Magnétorésistance tunnel

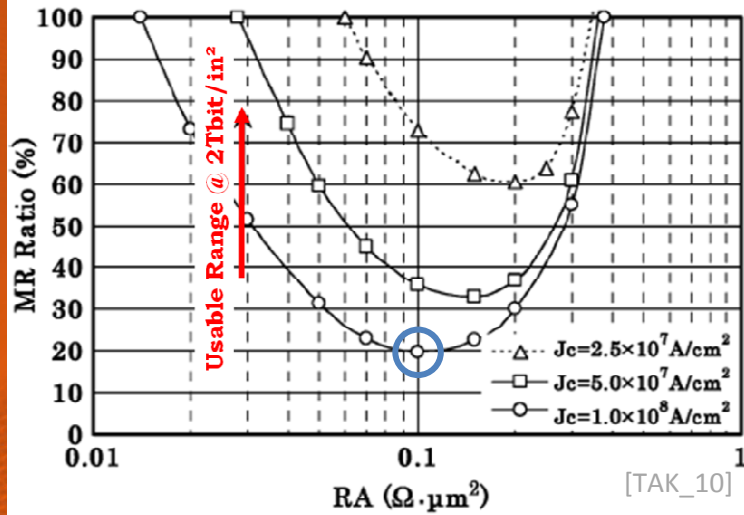
$$\text{TMR} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \times 100$$

- Résistance x Surface (RA)

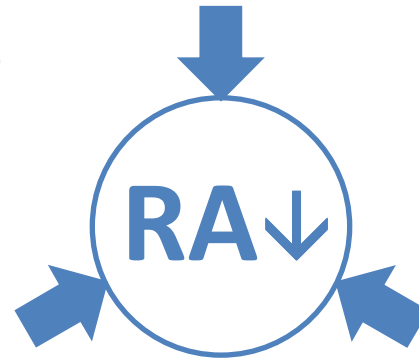
Etat
PARALLÈLE
→ Résistance faible



Applications bas RA



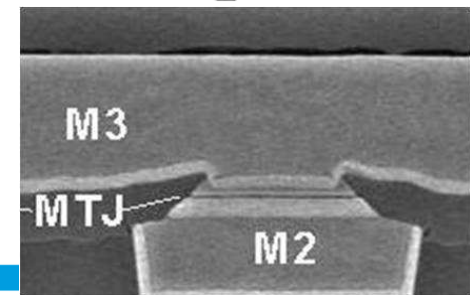
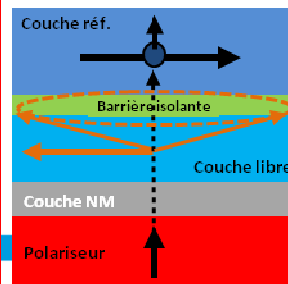
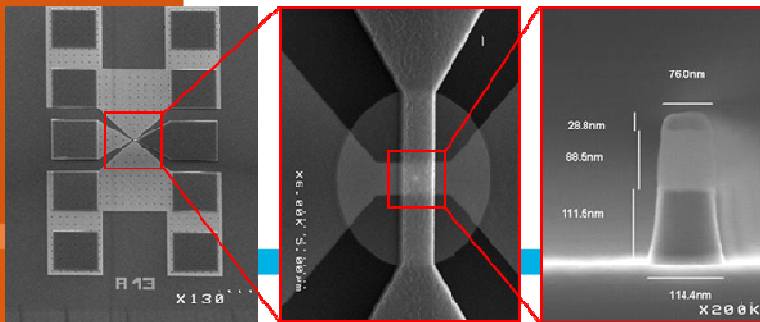
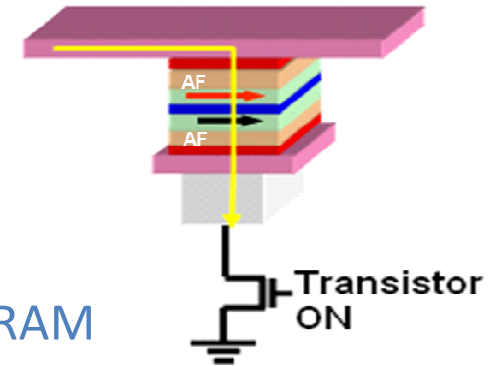
Têtes de lecture



Oscillateurs
magnétiques RF

STT-MRAM

$J_c > 10^7 \text{ A.cm}^{-2}$
 $\rightarrow \text{RA} = 5 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$



$\rightarrow \text{RA} < 2 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$

Intérêt du SrTiO₃ (STO)

$T_{\text{cristallisation}}$ (STO IBD 10-100nm) = 300°C ?
(K. Garelo et al, US Patent 216601, 2005)

Faible band gap 3,2 eV

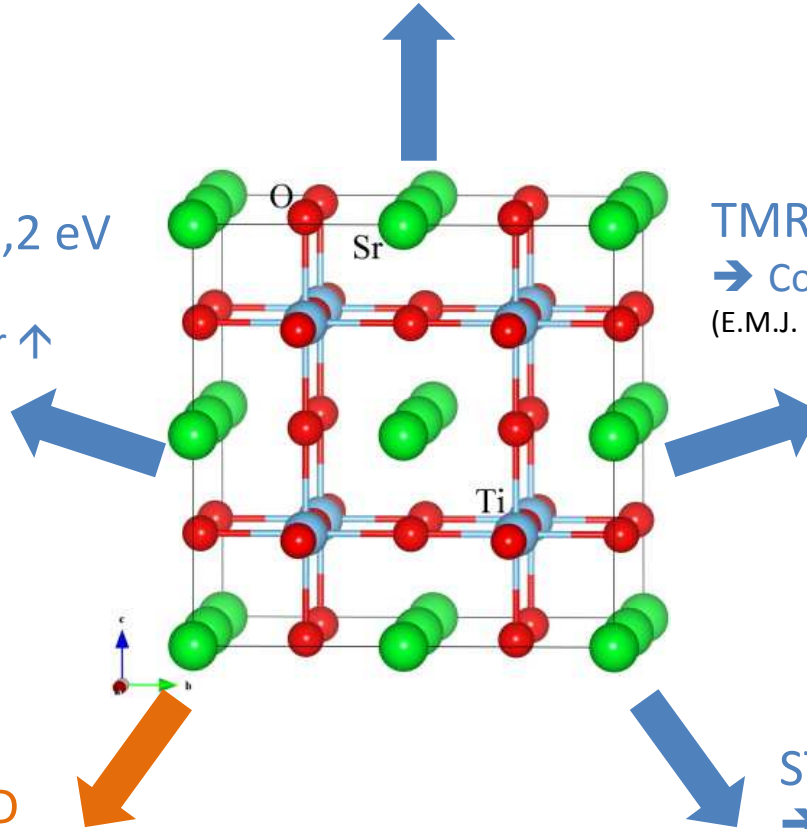
→ RA < 1 Ω.μm²

→ @RA cst, épaisseur ↑

$TMR_{\text{théorique}} = 3000\%$

→ Co / STO 9MC / Co

(E.M.J. Hassen et al, JAP 111, 07C727, 2012)



STO amorphe PVD

→ TMR = 2% @RT

→ RA = 4 kΩ.μm² @RT

(J.S. Coey et al, JMMM 321, 1009-1011, 2009)

STO épitaxié à 700°C

→ TMR = 1850% @4,2K

→ RA = 10 Ω.μm² @13K

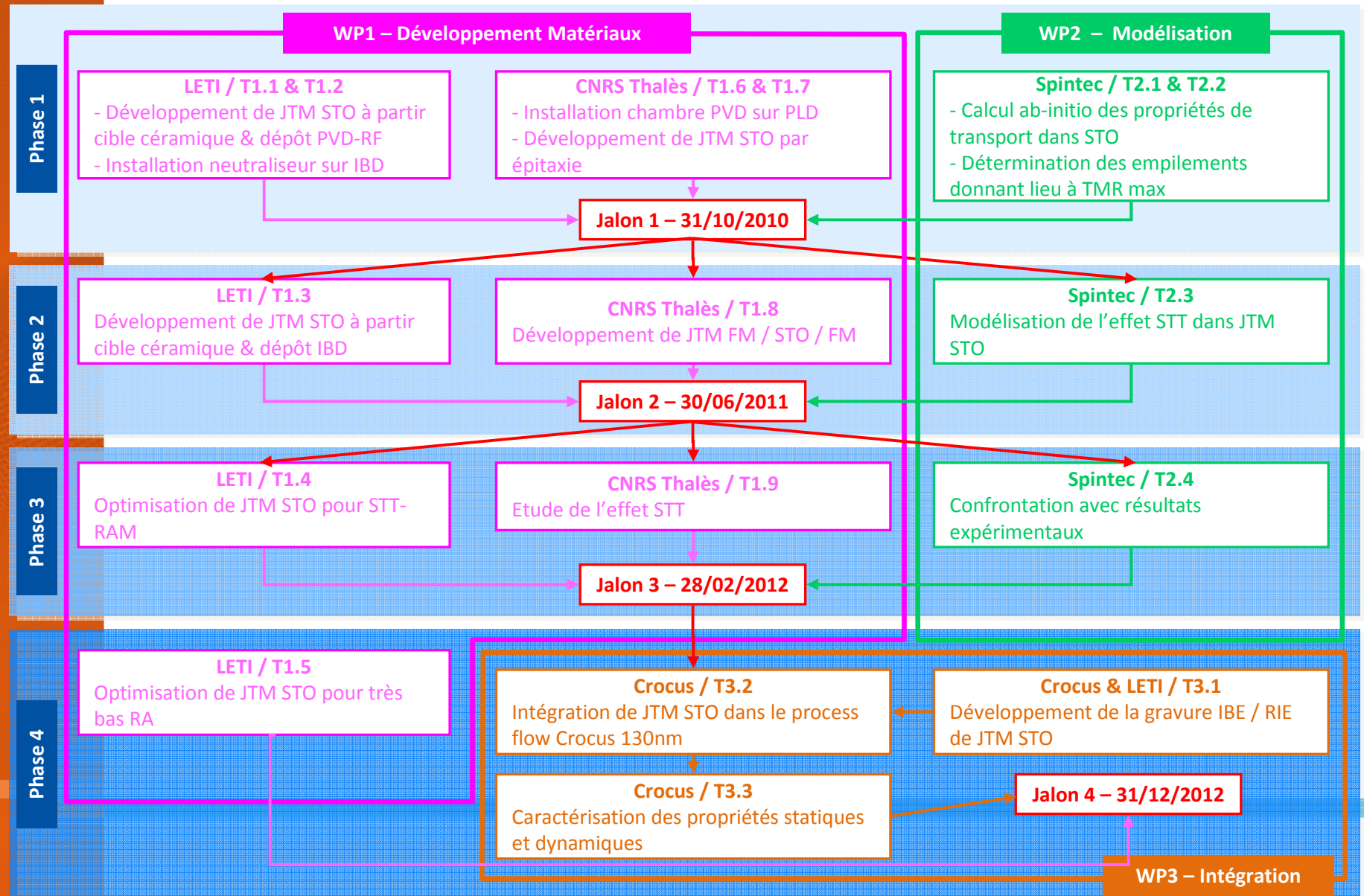
(M. Bowen et al, APL 82, 233, 2003)

(J.S. Noh et al, APL 79, 233, 2001)

Sommaire

- Contexte & Motivations
- **Organisation du projet**
- Modélisation des propriétés de transport dans SrTiO₃
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par PLD & PVD
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par IBD
- Intégration de jonctions à base de SrTiO₃
- Indicateurs d'impact
- Conclusion & Perspectives

Différentes phases du projet CRYSTO



Jalons du projet CRYSTO

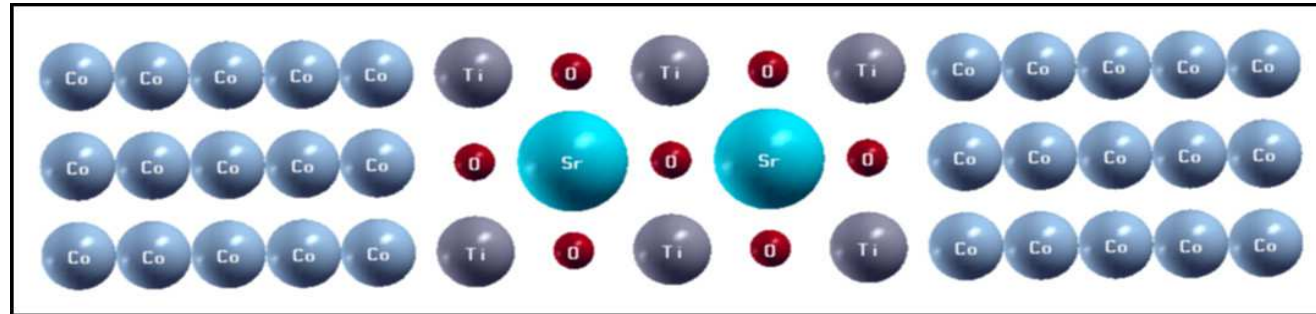
Jalons	Description	Leader	Date initiale	Date révisée	Critères
1	<p>I- Installation d'une chambre de PVD sur l'équipement PLD</p> <p>II- 1^{ère} Mesures des propriétés de transport des JTM à base de STO par PLD</p> <p>III- Modélisation ab-initio de JTM à base de STO et détermination des électrodes magnétiques permettant d'optimiser la TMR</p>	<p>I- CNRS THALES</p> <p>II- CNRS THALES</p> <p>III- SPINTEC</p>	Oct. 2010	<p>I- Mars 2011</p> <p>II- Juil 2011</p> <p>III- Avr. 2011</p>	<p>I- OK CNRS/THALES</p> <p>II- OK CNRS/THALES</p> <p>III- OK SPINTEC</p> <p>GO</p>
2	<p>I- TMR à température ambiante dans JTM du type CoFeB / STO / CoFeB</p> <p>II- Cristallisation du STO à basse température & TMR > 50%</p> <p>III- RA < 10 $\Omega \cdot \mu\text{m}^2$</p> <p>IV- Modélisation de l'effet STT dans des JTM à base de STO</p> <p>Go/NoGo- Intérêt du STO d'après critères I & II</p>	<p>I- CNRS THALES / LETI</p> <p>II- LETI</p> <p>III- LETI</p> <p>IV- SPINTEC</p>	Juin 2011	<p>I- Nov. 2011</p> <p>II- /</p> <p>III- Nov. 2011</p> <p>IV- Mai 2012</p>	<p>I- OK LETI</p> <p>II- NON LETI</p> <p>III- OK LETI</p> <p>IV- OK SPINTEC</p> <p>GO car critères I, III & IV remplis</p>
3	<p>I- JTM avec TMR & RA compatible avec effet STT</p> <p>II- Courant critique pour écriture STT < 5.10⁶ A/cm²</p> <p>III- Propriétés électrique des JTM à base de STO dépassant celles à base de MgO</p> <p>IV- JTM à base de STO avec RA < 5 $\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ & TMR >100% par IBD</p> <p>Go/NoGo- Intégration dans la ligne de production CROCUS d'après critères I, II & III. Sinon intégration sur la plate-forme PTA</p>	<p>I- CNRS THALES / LETI / SPINTEC</p> <p>II- CNRS THALES / LETI</p> <p>III- CNRS THALES / LETI / CROCUS</p> <p>IV- LETI</p>	Fév. 2012	<p>I- Juin 2012</p> <p>II- Juin 2012</p> <p>III- Juin 2012</p> <p>IV- Juin 2012</p>	<p>NOGO pour intégration dans la ligne de production CROCUS</p> <p>GO pour intégration par CROCUS sur la plate-forme PTA</p>
4	<p>I- Intégration de JTM à base de STO sur la plate-forme PTA</p> <p>II- Comparaison de l'effet STT dans STO & MgO</p> <p>III- Fabrication de JTM avec RA < 1 $\Omega \cdot \mu\text{m}^2$ & TMR >100% par IBD</p>	<p>I- CROCUS</p> <p>II- CROCUS</p> <p>III- LETI</p>	<p>Juil. 2012</p> <p>Déc. 2012</p>	<p>Déc. 2012</p>	

Sommaire

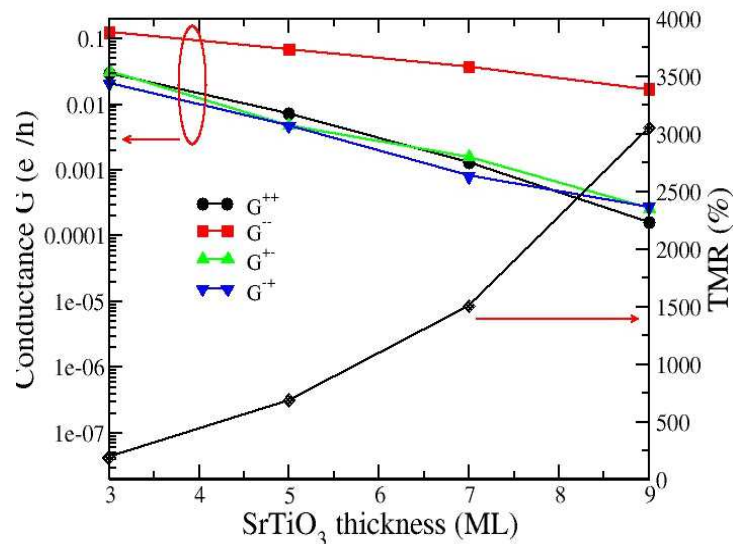
- Contexte & Motivations
- Organisation du projet
- **Modélisation des propriétés de transport dans SrTiO₃**
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par PLD & PVD
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par IBD
- Intégration de jonctions à base de SrTiO₃
- Indicateurs d'impact
- Conclusion & Perspectives

Influence de la nature des électrodes

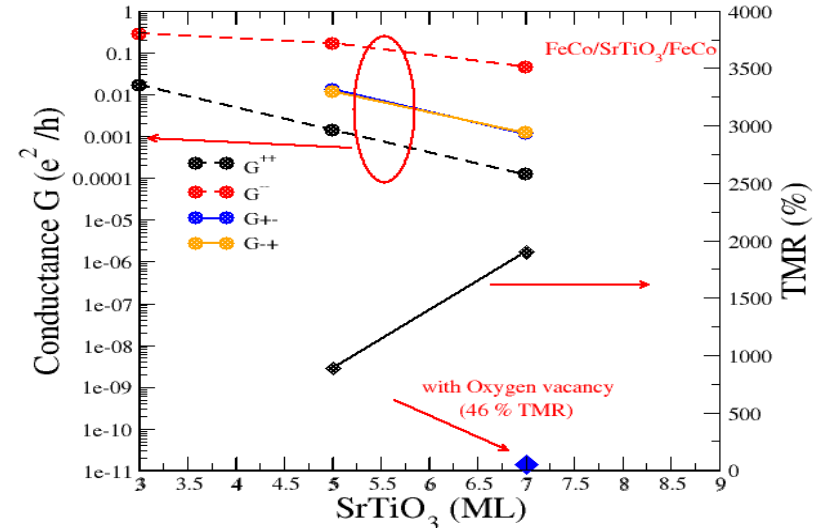
- Modélisation des propriétés de transport à partir du code "Quantum Espresso" basé sur le formalisme Landauer-Buttiker



- Co bcc / STO / Co bcc



- FeCo bcc / STO / FeCo bcc



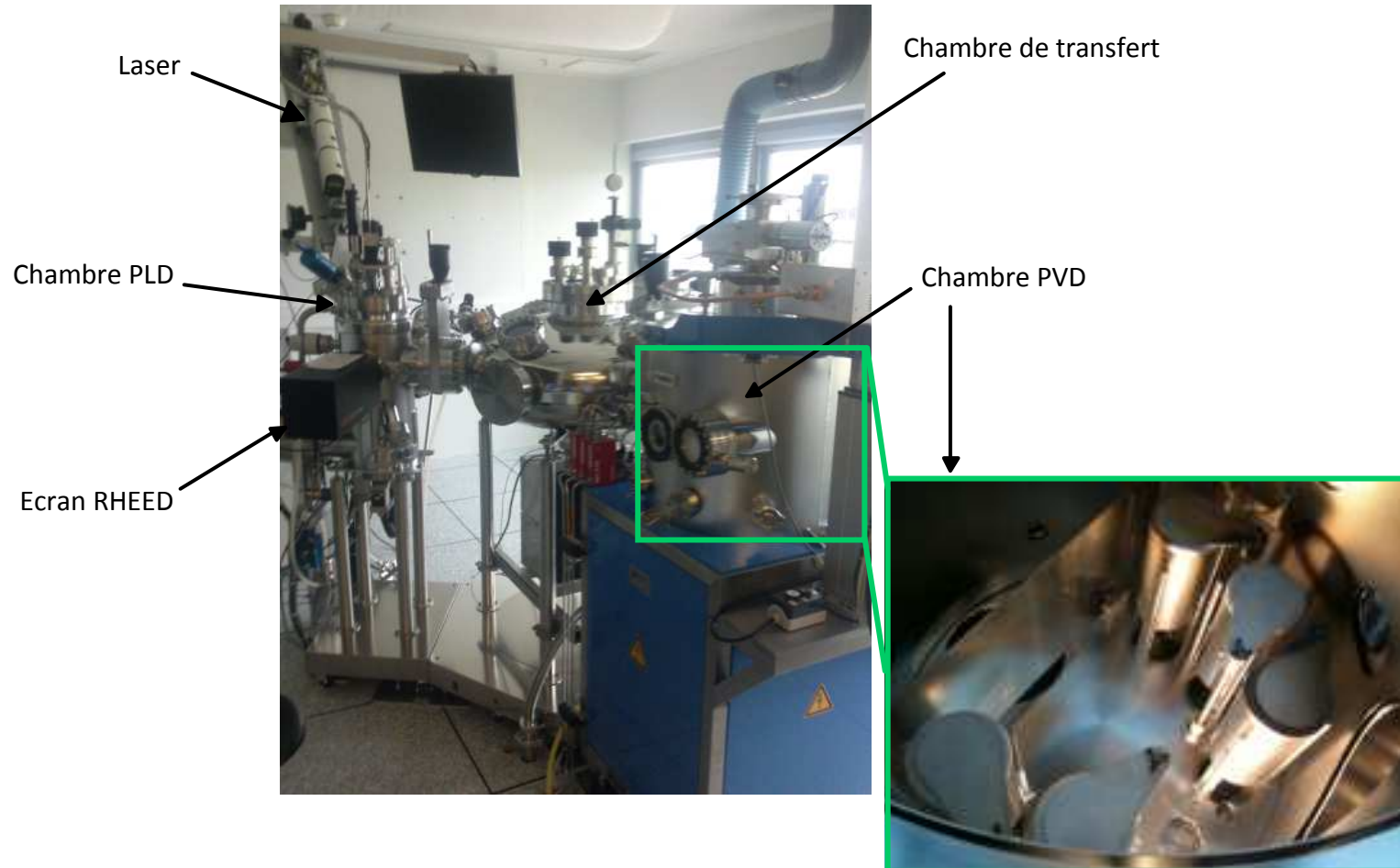
- ➔ 1.6nm STO (9ML) : TMR = 3000% avec électrodes Co
- ➔ 1.6nm MgO (8ML) : TMR = 5600% avec électrodes Fe (X-G. Zhang et al, PRB 70, 172407, 2004)
- ➔ 1.2nm STO (7ML) : TMR = 1900% avec électrodes FeCo contre 1500% avec électrodes Co
- ➔ Chute de la TMR à 46% en cas de lacunes d'oxygène dans STO

Sommaire

- Contexte & Motivations
- Organisation du projet
- Modélisation des propriétés de transport dans SrTiO_3
- **Développement de jonctions à base de SrTiO_3 par PLD & PVD**
- Développement de jonctions à base de SrTiO_3 par IBD
- Intégration de jonctions à base de SrTiO_3
- Indicateurs d'impact
- Conclusion & Perspectives

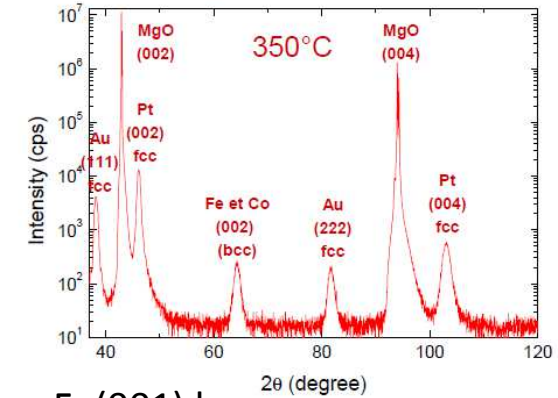
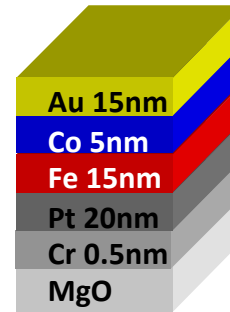
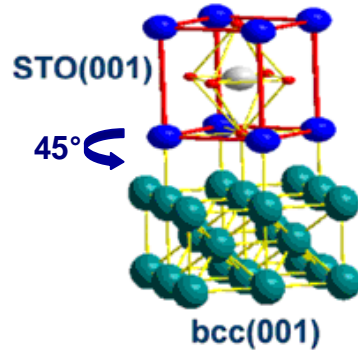
Technique de dépôt

- Système couplé Ablation Laser (PLD) & Pulvérisation (PVD)



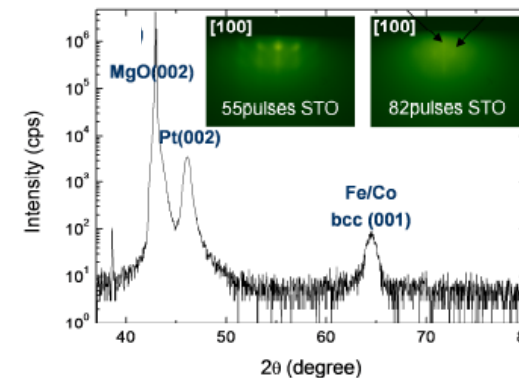
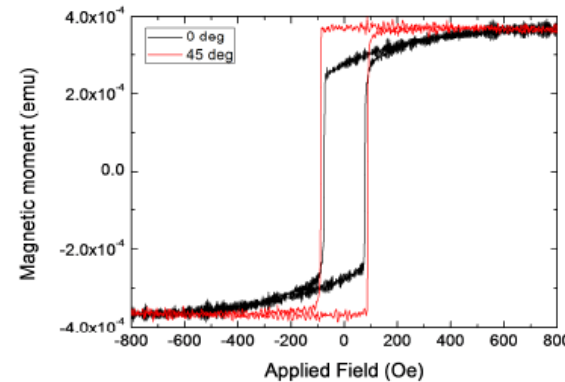
Jonctions épitaxiées

- Electrode inférieure MgO // Cr / Pt / Fe / Co / Au déposée à 350°C



→ Co(001) bcc stabilisé par épitaxie sur Fe(001) bcc

- Hétérostructure MgO // Cr / Pt / Fe / Co / STO avec STO déposé à T < 100°C



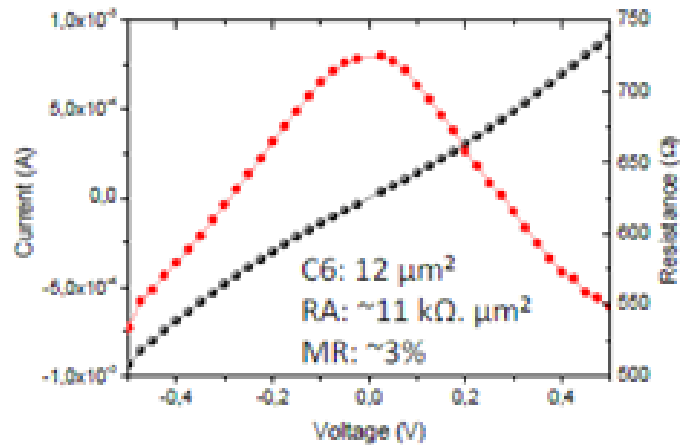
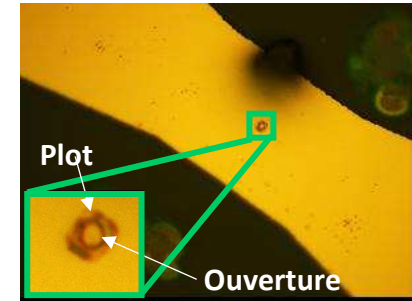
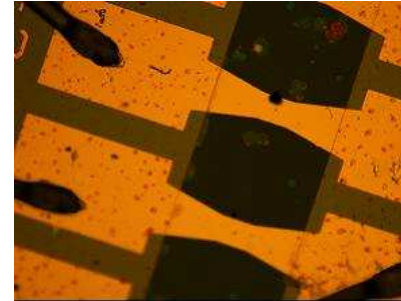
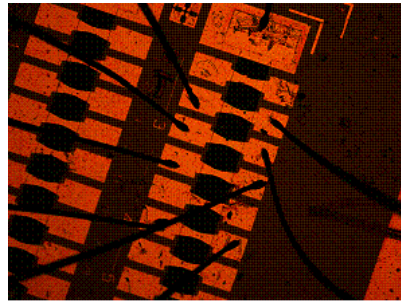
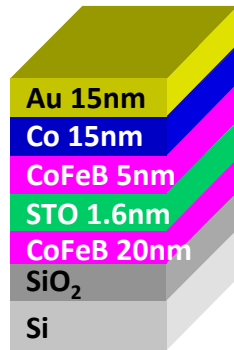
- Propriétés magnétiques de l'électrode inférieure conservées : axe facile selon [110]
- Structure conservée : STO orienté à 45° par rapport au Co(001) bcc

- Hétérostructure complète MgO // Cr / Pt / Fe / STO / Fe / NiFe / Au

→ Nano-structuration achevée et tests électriques en cours

Jonctions amorphes

- Hétérostructure complète Si / SiO₂ // CoFeB / STO sous 0.04mbar O₂ / CoFeB / Co / Au



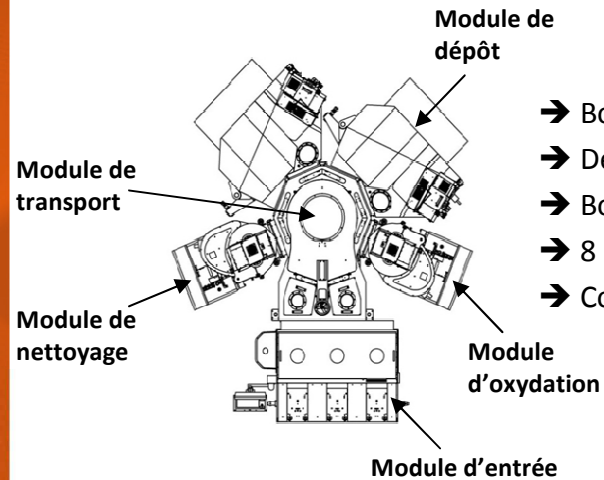
Aire de la jonction (μm^2)	Produit RA ($\text{k}\Omega \cdot \mu\text{m}^2$)	MR (%)
12	11	~ 3
24	5	~ 2
48	18	$\sim 1,2$
48	5	$\sim 1,4$
96	15	~ 1

Sommaire

- Contexte & Motivations
- Organisation du projet
- Modélisation des propriétés de transport dans SrTiO_3
- Développement de jonctions à base de SrTiO_3 par PLD & PVD
- **Développement de jonctions à base de SrTiO_3 par IBD**
- Intégration de jonctions à base de SrTiO_3
- Indicateurs d'impact
- Conclusion & Perspectives

Techniques de dépôt et de caractérisation

- Pulvérisation par faisceau d'ions (IBD)



- Bonne uniformité
- Dépôt à basse pression $< 1.10^{-4}$ mbar
- Bon contrôle de la stœchiométrie
- 8 cibles
- Compatible 200 - 300mm



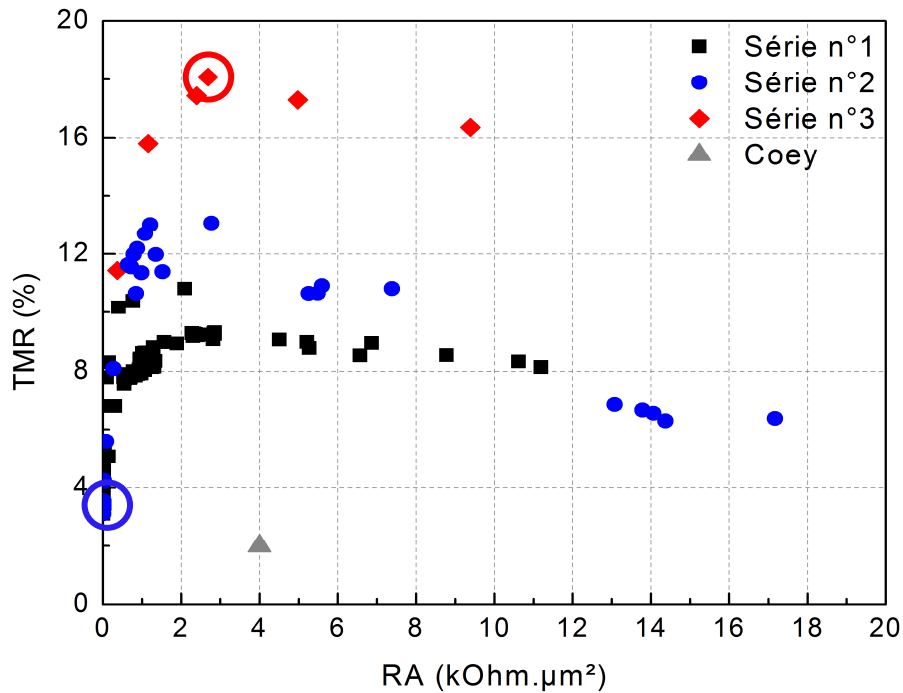
- Mesure de transport pleine tranche CAPRES



- Mesure pleine tranche de TMR & RA
- Pas d'étapes technologiques
- Adaptation minime de l'empilement



Transport après recuit à 340°C



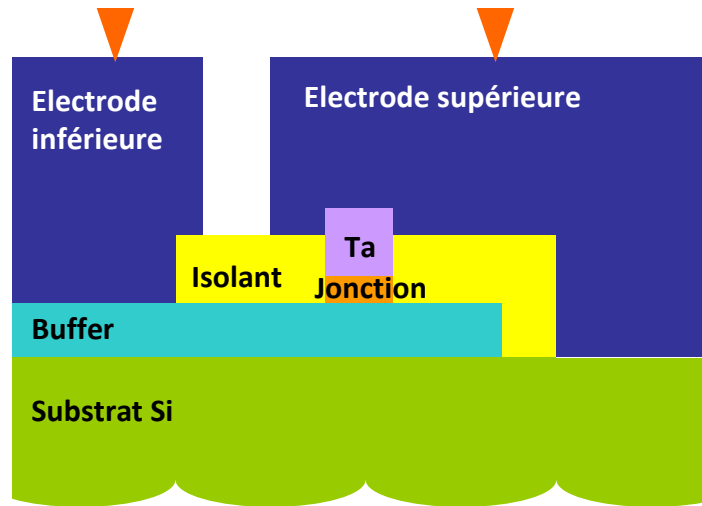
- Série n°1 : Sans & Avec post-oxydation naturelle ou radicalaire
- Série n°2 : Variation de la vitesse de dépôt STO
- Série n°3 : Optimisation de l'uniformité via inclinaison du substrat
- Coey et al : TMR = 2 % & RA = 4 kΩ.µm²
- Modélisation : Chute de la TMR à 46% en cas de lacunes d'oxygène dans FeCo bcc / STO 1.2nm / FeCo bcc

Buffer / PtMn 20 / CoFe 2,5 / Ru 0,85 / CoFeB 2 / STO / CoFeB 3 / Capping		
Paramètres	TMR élevée	RA faible
Epaisseur barrière (nm)	1,5	1,0
Tension de grille (V)	400	800
Type post-oxydation	Naturelle	Radicalaire
TMR (%)	18	3,7
RA (Ω.µm ²)	2800	2,6

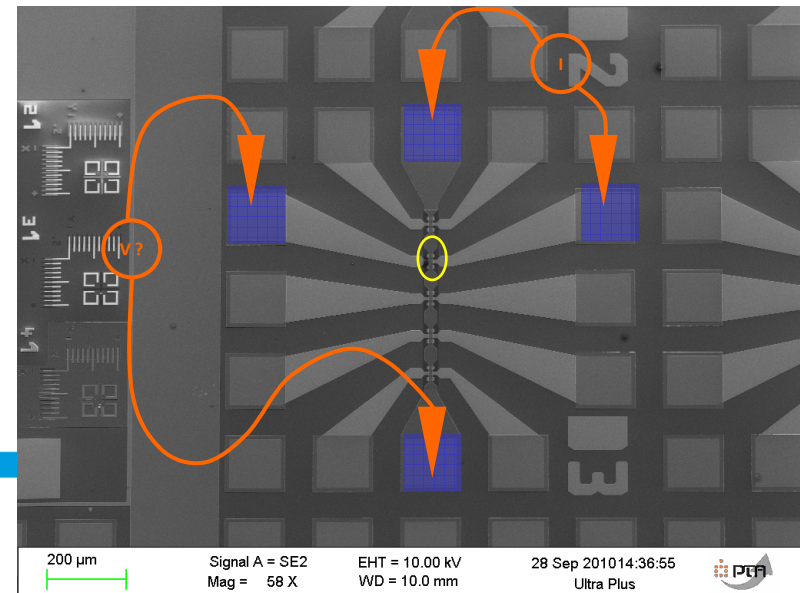
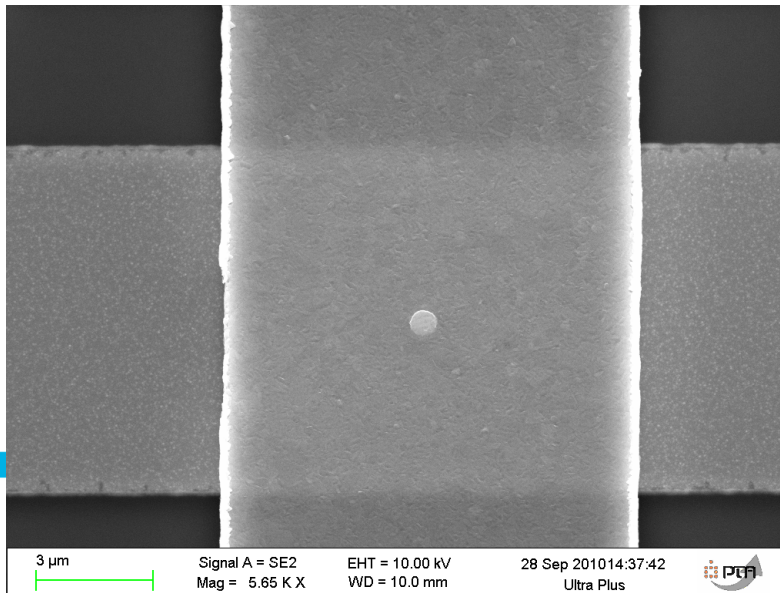
Sommaire

- Contexte & Motivations
- Organisation du projet
- Modélisation des propriétés de transport dans SrTiO₃
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par PLD & PVD
- Développement de jonctions à base de SrTiO₃ par IBD
- **Intégration de jonctions à base de SrTiO₃**
- Indicateurs d'impact
- Conclusion & Perspectives

Nano-structuration des piliers



- Filière technologique sur la plate-forme PTA
- Piliers de diamètre = 100, 200, 300, 400, 500nm
- Test électrique automatique VEECO sur plaque
- Test électrique sur dispositif individuel



Sommaire

- Contexte & Motivations
- Organisation du projet
- Modélisation des propriétés de transport dans SrTiO_3
- Développement de jonctions à base de SrTiO_3 par PLD & PVD
- Développement de jonctions à base de SrTiO_3 par IBD
- Intégration de jonctions à base de SrTiO_3
- **Indicateurs d'impact**
- Conclusion & Perspectives

Valorisation & Impact

- Recrutements

- UMR CNRS THALES, C. Daumont, CDD, 01/2010 → 03/2012
- CEA/SPINTEC, B. Belhadji, CDD, 06/2010 → 05/2012
- CEA / LETI, E. Hassen, Thèse, 10/2009 → 10/2012

- Publications

- H. X. Yang et al, "Effect of structural relaxation and oxidation conditions on interlayer exchange coupling in Fe|MgO|Fe tunnel junctions", Appl. Phys. Lett. 96, 262509 (2010)
- M. Bibes et al, "Ultrathin oxide films and interfaces for electronics and spintronics", Adv. Phys. 60, 5 (2011)
- C. Daumont et al, "Strain dependence of polarization and piezoelectric response in epitaxial BiFeO₃ thin films", J. Phys. Condens. Matter. 24, 162202 (2012)
- E. M. J. Hassen et al, "Room temperature magnetoresistance in CoFeB/SrTiO₃/CoFeB magnetic tunnel junctions deposited by ion beam sputtering", J. Appl. Phys. 111, 07C727 (2012)

Valorisation & Impact

- Communications

- H.X. Yang et al, "Effect of oxidation conditions on interlayer exchange coupling in Fe|MgO|Fe tunnel junctions from first-principles and tight binding approaches",
11th Joint MMM/Intermag Conference, Washington, USA, Janvier 2010 (Poster)
APS March Meeting, Portland, USA, Mars 2010 (Poster)
Colloque Louis Néel, Albé, France, Mars 2010 (Poster)
- M. Chshiev et al, "Theory of spintronic phenomena in magnetic tunnel junctions", Topical School "Quantum aspects of the physics of low dimensional systems", Collège Doctoral, Nancy, France, November 2010 (Cours Invité)
- M. Chshiev et al, "Spin transport in noncollinear magnetic configurations by first-principles and tight-binding approaches", Atelier du Groupement de Recherche (GDR) Co-DFT "Théorie et modélisation pour le magnétisme: de la molécule au transport polarisé en spin", Centre Blaise Pascal ENS Lyon, Gerland, Lyon, November 2010 (Oral Invité)
- C. Daumont et al, "Magnetic tunnel junctions based on SrTiO₃ tunnel barriers", International School of Oxide Electronics, Cargèse, France, Octobre 2011 (Poster)
- M. Chshiev et al, "Spin transport phenomena in nanostructures with non-collinear magnetic moments", AVS 58th Annual International Symposium and Exhibition, Nashville, USA, November 2011 (Oral Invité)
- E. M. J. Hassen et al, " Room temperature magnetoresistance in CoFeB/SrTiO₃/CoFeB magnetic tunnel junctions deposited by ion beam sputtering", 56th MMM Conference, Scottsdale, USA, Novembre 2011 (Oral)
- H. X. Yang et al, "First-principle studies of interlayer exchange coupling in Co|SrTiO₃|Co magnetic tunnel junctions", 56th MMM Conference, Scottsdale, USA, November 2011 (Oral)
- M. Bibes et al, "Tuning ferroelectricity and magnetism by strain in BiFeO₃", Heraeus seminar, Bad Honnef, Allemagne, Avril 2012 (Oral invité)
- M. Bibes et al, "Putting a strain on BiFeO₃", Royal Society Meeting of Magnetoelectric Phenomena and Devices, Londres, UK, Sept. 2012 (Oral Invité)
- M. Chshiev et al, "Theoretical aspects of spintronic phenomena in magnetic tunnel junctions and graphene based structures", plénière GdR Physique Quantique Mésoscopique, Aussois, France, Octobre 2012 (Oral Invité)

Sommaire

- Contexte & Motivations
- Organisation du projet
- Modélisation des propriétés de transport dans SrTiO_3
- Développement de jonctions à base de SrTiO_3 par PLD & PVD
- Développement de jonctions à base de SrTiO_3 par IBD
- Intégration de jonctions à base de SrTiO_3
- Indicateurs d'impact
- **Conclusion & Perspectives**

Conclusion & Perspectives

- STO IBD non concurrent du MgO, mais bien au-delà de l'état de l'art du STO PVD

Paramètres	TMR (%)	RA ($\Omega \cdot \mu\text{m}^2$)
STO IBD LETI	25	740
STO PVD Coey et al	2	4000
MgO PVD Ikeda et al	600	1

(J.S. Coey et al, JMMM 321, 1009-1011, 2009)

(S. Ikeda et al, APL 93, 082508C, 2008)



Merci de votre attention

