

# Dichroïsme circulaire magnétique EMCD (Electron Energy Loss Magnetic Chiral Dichroism) dans un microscope électronique en transmission équipé d'un correcteur d'aberration sphérique

F.Houdellier<sup>1\*</sup>, B.Warot-Fonrose<sup>1</sup>, M.J.Hýtch<sup>1</sup>, E.Snoeck<sup>1</sup>, L.Calmels<sup>1</sup>, V.Serin<sup>1</sup> and P.Schattschneider<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> CEMES-CNRS, 29 rue J. Marvig, 31055 Toulouse, France.

<sup>2</sup> en visite de: Technische Universität Wien A-1040 Wien Österreich

---

**Résumé** – Le dichroïsme circulaire magnétique peut être observé avec des électrons non polarisés en spin. Dans ce cas, le signal provient de la différence d'intensité aux seuils  $L_{2,3}$ , dans le cas des matériaux 3d, prise pour deux positions particulières du plan de diffraction. En combinant différentes techniques de diffraction et de détection ainsi que les avantages du correcteur d'aberration sphérique, nous avons pu obtenir un signal EMCD significatif, reproductible et en accord avec la théorie.

---

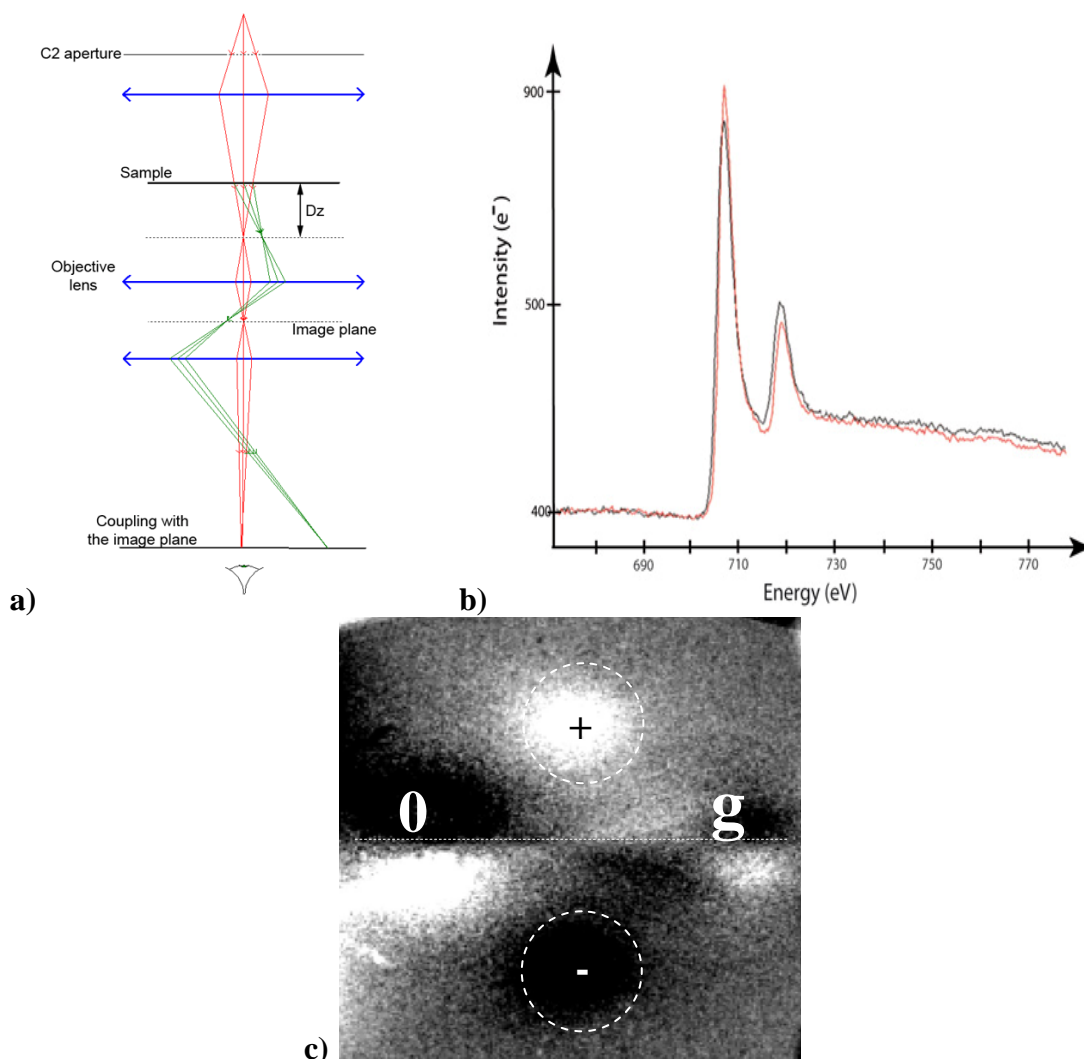
## 1. Introduction

Le XMCD (X-ray magnetic circular dichroism) est un outil performant pour analyser les propriétés magnétiques de matériaux. Le signal provient de la différence d'absorption, par le matériau magnétique, du rayonnement polarisé circulairement droit ou gauche. Le phénomène est chimiquement sélectif et permet la détermination du moment magnétique orbital et de spin à partir de règles de somme appliquées aux spectres expérimentaux [1,2]. La technique nécessite l'utilisation d'un rayonnement synchrotron et reste limitée en résolution spatiale à une dizaine de  $\mu\text{m}^2$ . Avec des lentilles adaptées aux rayons X ou en utilisant le PEEM (PhotoEmission Electron Microscopy), des résolutions spatiales inférieures à 50nm peuvent être obtenues.

Une méthode a été proposée récemment afin d'observer le dichroïsme circulaire magnétique dans un TEM sans l'intervention d'un faisceau d'électrons polarisés en spin [3,4]. Comme en XMCD, un signal dichroïque peut être détecté, appelé EMCD, grâce aux spectres de pertes d'énergie (EELS) obtenus pour des seuils proches des transitions de cœur des matériaux magnétiques ( $L_{2,3}$  dans le cas des matériaux 3d), et avec une meilleure résolution spatiale. Le signal dichroïque est mesuré entre deux positions particulières du diagramme de diffraction où la partie imaginaire de la MDFD (Mixed Dynamical Form Factor) possède des signes opposés. Dans la configuration expérimentale initiale, le signal EMCD reste faible et difficile à exploiter en pratique [3].

## 2. Résultats

Grâce au SACTEM-Toulouse, un Tecnai F20 (FEI) équipé d'un correcteur d'aberration sphérique (CEOS), d'un biprisme rotatif (FEI) et d'un filtre en énergie (Gatan Tridiem), nous avons amélioré à la fois les conditions de diffraction et la méthode de détection du signal inélastique. Nous avons augmenté l'intensité du signal dichroïque (Figure 1.b) en utilisant la configuration LACDIF (Figure 1.a) qui combine les avantages du LACBED et de la correction d'aberration sphérique [5] et en détectant le signal EELS par des techniques résolues spatialement. L'asymétrie dans la partie imaginaire de la MDFD peut-être étudiée spatialement dans le cliché de diffraction grâce à l'ESI (Energy Spectroscopic Imaging), permettant la visualisation directe des positions dichroïques les plus significatives (Figure 1.c) [6].



**Figure 1** - *a) configuration LACDIF  
 b) signal EMCD observé sur un échantillon de fer monocristallin en configuration LACDIF  
 c) Asymétrie du cliché ESI pour le seuil  $L_3$  du fer en orientation systématique ( $\vec{g} = 110$ ).*

Une comparaison systématique entre différentes configurations de diffraction et de détection du signal inélastique a été réalisée pour déterminer les conditions optimales. Nous avons également analysé l'évolution du signal EMCD en fonction du matériau étudié (Fe, Co, Cu, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Cr, V, etc), de l'épaisseur traversée, etc ...

### 3. Discussion

Jusqu'à présent, le meilleur signal EMCD, obtenu à partir d'un échantillon de fer (Figure 1b), reste comparable mais plus faible que celui observé en XMCD (8% en EMCD au lieu de 20% en XMCD). Cette différence est expliquée par la présence importante d'effets dynamiques associés aux conditions de diffraction utilisées (orientation, épaisseur, etc ...). Une amélioration du signal passe donc forcément par une minimisation de ces effets. Nous présenterons les résultats prenant en compte cette minimisation

### 4. Références

[1] B.T.Thole, G.van der Laan, et G.A.Sawatzky, Phys.Rev.Lett. **55**, (1985) 2086.  
 [2] B.T.Thole, P.Carra, F.Sette, et G.van der Laan, Phys.Rev.Lett. **68**, (1992) 1943.  
 [3] C. Hébert, P. Schattschneider, Ultramicroscopy 96 (2003) 463.  
 [4] P. Schattschneider, S. Rubino, C. Hébert, J. Rusz, J. Kunes, P. Novak, E. Carlino, M. Fabrizioli, G. Panaccione, G. Rossi, Nature 441 (2006) 486  
 [5] J.P. Morniroli, F. Houdellier, C. Roucau, J. Puigalli, S. Gesti and A. Redjaimia **accepted** in Ultramicroscopy  
 [6] B.Warot-Fonrose, F.Houdellier, M.J.Hýtch and E.Snoeck **accepted** in Ultramicroscopy