



**HAL**  
open science

## Etude de guides d'ondes par PIXE en mode Kossel

Philippe Jonnard, Jiaping Zhang, Christopher Pendenque, Karine Le Guen,  
Renaud Delaunay, Ian Vickridge, Didier Schmaus

► **To cite this version:**

Philippe Jonnard, Jiaping Zhang, Christopher Pendenque, Karine Le Guen, Renaud Delaunay, et al.. Etude de guides d'ondes par PIXE en mode Kossel. 13ème Colloque “ Rayons X et Matière ” (RX2019), Nov 2019, Nancy, France. hal-03932776

**HAL Id: hal-03932776**

**<https://hal.science/hal-03932776>**

Submitted on 10 Jan 2023

**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.

# Etude de guides d'ondes par PIXE en mode Kossel

P. Jonnard<sup>1</sup>, J.-P. Zhang<sup>1,2</sup>, K. Le Guen<sup>1</sup>, R. Delaunay<sup>1</sup>, I. Vickridge<sup>3</sup>, D. Schmaus<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université, CNRS UMR 7614, Laboratoire de Chimie Physique - Matière et Rayonnement, 4 place Jussieu, F-75252 Paris cedex 05, France

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Solidification Processing, Shaanxi Key Laboratory of Fiber Reinforced Light-Weight Composites, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

<sup>3</sup> Sorbonne Université, CNRS UMR 7588, Institut des NanoSciences de Paris, 4 place Jussieu, F-75252 Paris cedex 05, France

Courriel : [philippe.jonnard@sorbonne-universite.fr](mailto:philippe.jonnard@sorbonne-universite.fr)

L'émission de rayons X induite par protons (PIXE) combinée à la diffraction de Kossel est développée comme méthode de caractérisation structurale non-destructive de couches minces d'épaisseur nanométrique. Cette méthode consiste à mesurer en fonction de l'angle de détection (grazing exit) l'intensité d'une ou plusieurs émissions X caractéristiques d'éléments présents dans un empilement de couches minces. Ici, l'empilement est choisi de sorte qu'il se comporte comme un guide d'onde planaire, c'est-à-dire que dans une certaine gamme angulaire des interférences constructives se développent, conduisant à la variation en profondeur l'intensité du champ électrique associée à la radiation émise. La mesure PIXE-Kossel menée autour de la gamme angulaire du guide d'onde permet d'obtenir une information sensible en profondeur et ainsi de remonter à la structure l'empilement en particulier de ses interfaces.

La méthode PIXE-Kossel est reliée aux méthodes basées sur l'observation d'intensités d'émissions en mode d'onde stationnaire dans des empilements périodiques [1]. Nous montrons ici qu'elle peut se généraliser à des systèmes non-périodiques de couches minces, pourvu qu'un système de guide d'ondes puisse être créé à l'intérieur de la structure. Nous montrons aussi que l'emploi d'une caméra à rayons X à dispersion d'énergie permet de mesurer l'intensité des émissions X en fonction de l'angle de détection, que nous appelons courbe de Kossel, avec un dispositif expérimental simple ne nécessitant aucun mouvement mécanique, Fig. 1.

La méthode est appliquée à l'étude d'un empilement Pt/Fe/Pt déposé par pulvérisation magnétron sur un substrat de silicium [2]. Les épaisseurs visées des couches étaient comprises entre 4 et 10 nm et choisies de sorte qu'un système de guide d'onde puisse se développer aux énergies de photon des émissions caractéristiques Fe K et Pt L, Fig. 2. Un faisceau de protons de 1,6 MeV généré par l'accélérateur Van de Graaff de la plateforme SAFIR (Système d'analyse par Faisceaux d'ions Rapides) a été utilisé pour produire l'ionisation des atomes de l'échantillon. Une caméra CCD ANDOR iKon-M à dispersion d'énergie, 1024 × 1024 pixels de 13 × 13 μm, a été utilisée pour enregistrer les émissions de rayons X générées. Cette caméra CCD produit un spectre de rayons X en chacun de ses pixels. Dans notre cas, chaque colonne de pixels correspond à un angle de détection, Fig. 1.

Nous montrons sur la figure 3 les courbes de Kossel obtenues aux énergies des émissions Fe K et Pt L ainsi que leurs simulations. De fortes variations des intensités sont observées dans la gamme dans la gamme angulaire où le guidage d'onde prend place, avec un maximum vers 0.6° et 0.4° aux énergies des émissions Fe K et Pt L respectivement, en accord avec les distributions d'intensité du champ électrique montrées en Fig. 2. Si l'empilement conçu initialement, une tri-couche, est choisi pour simuler les courbes, l'accord est moins bon que si un composé Pt<sub>69</sub>Fe<sub>31</sub> épais d'environ 1,5 nm est considéré aux interfaces Pt-sur-Fe et Fe-sur-Pt. Un tel composé est attendu dans le système Pt-Fe [3]. Les mesures de réflectivité X, sensibles à la structure de l'empilement, ne donnent pas de différence claire entre les types de structures, tri-couche avec ou sans composé interfacial. L'ajout de l'information élémentaire, apportée par PIXE-Kossel, permet d'apporter une description réaliste de l'empilement de couches minces d'épaisseur nanométrique.

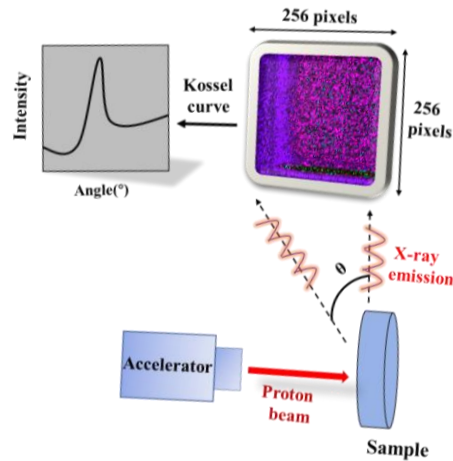


Figure 1. Schema d'une expérience PIXE-Kossel.

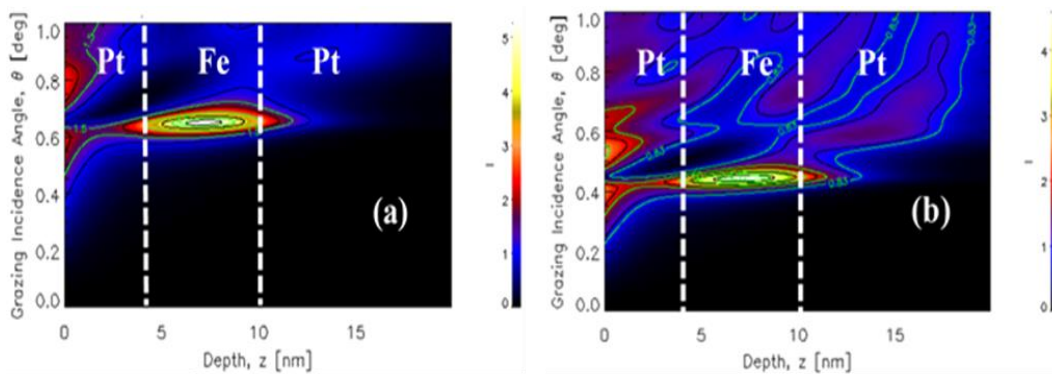


Figure 2. Simulation de la distribution angulaire et en profondeur du champ électrique dans un empilement Pt/Fe/Pt aux énergies des émissions (a) Fe  $K\alpha$  (6403 eV) et (b) Pt  $L\alpha$  (9442 eV). La surintensité dans la couche de fer démontre l'effet du guidage d'onde à 0.6° (a) ou 0.4° (b).

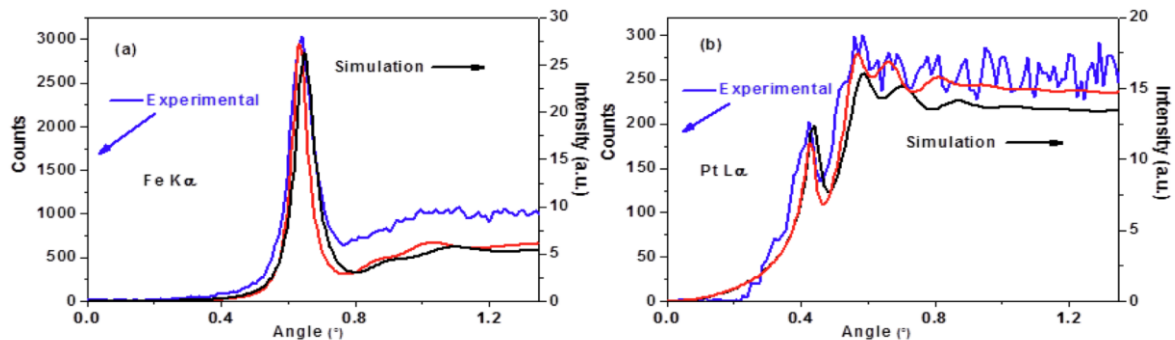


Figure 3. Comparaison des courbes de Kossel expérimentales (lignes bleues) et simulées aux énergies des émissions Fe  $K\alpha$  (gauche) et Pt  $L\alpha$  (droite) dans l'empilement Pt/Fe/Pt montré en Fig. 1. Les simulations sont effectuées soit avec les paramètres (épaisseur et nombre de couches) de l'empilement définis lors de la conception du guide d'onde (courbes noires), soit en considérant un composé interfacial FePt (courbes rouges).

- [1] Kossel effect in periodic multilayers, K. Le Guen et coll., J. Nanosci. Nanotechnol. **19**, 593 (2019).
- [2] Kossel interferences of proton-induced X-ray emission lines to study thin film waveguides, J.-P. Zhang et coll., NIM **B452**, 12 (2019).
- [3] Magneto-optical spectra in Pt/Co and Pt/Fe multilayers, K. Sato et coll., Jpn. J. Appl. Phys. **31**, 3603 (1992).

**Indiquer le nom de la personne à contacter :**

**Nom : JONNARD                      Prénom :     Philippe**  
**Courriel : philippe.jonnard@sorbonne-universite.fr**

**Indiquer le thème de votre présentation :**

- Surfaces, interfaces, nanostructures

**Indiquer votre mode de présentation préféré :**

Communication orale\*