

Exemple d'utilisation d'une caméra CCD à sélection d'énergie (color camera)

Philippe JONNARD

LCPMR, Sorbonne Université – CNRS, Paris



Sommaire

- 1. CAMERA CCD A SELECTION D'ENERGIE**
- 2. APPLICATION A LA DIFFRACTION DE KOSSEL**
- 3. AUTRE UTILISATION?**

1

CAMERA CCD A SELECTION D'ENERGIE

Association

- Une caméra CCD
- Un logiciel pour convertir la charge collectée dans chaque pixel en énergie de photon
- **Chaque pixel de la caméra est un détecteur EDS**
- Fonctionnement équivalent à celui d'un SDD
- Mode de comptage photon unique (single-photon counting mode)
- Fonctionne dans une large gamme spectrale (qq 10 eV à qq 10 keV, selon la caméra)
- Résolution spectrale d'environ 150 eV à 6 keV
- Efficacité de détection > 30% dans toute la gamme spectrale

Exemples

- The pnCCD Color X-Ray Camera® (CXC) de PNDetector (<https://pndetector.de/>)

- **ANDOR iKon-M**

- Back-illuminated deep-depletion

- Taille des pixels

13 μm x 13 μm (1024 x 1024)

- Refroidissement Pelletier

-80°C (bas bruit)

- Gamme spectrale

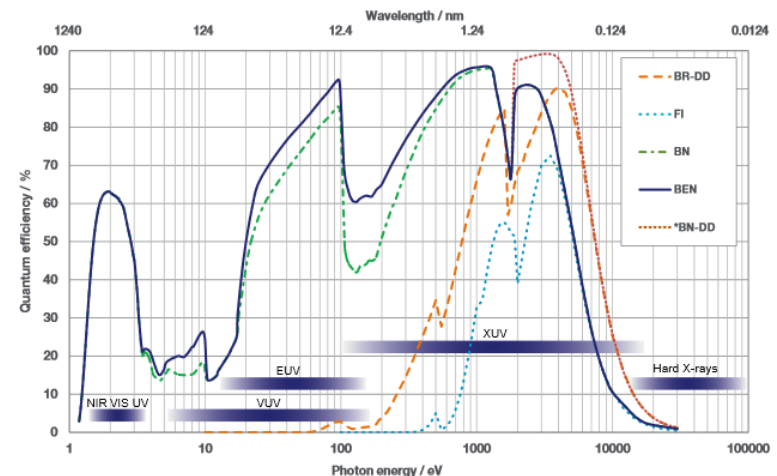
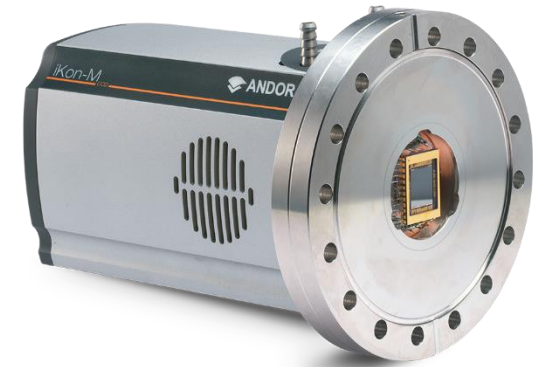
qq eV – 20 keV

- Efficacité détection

>10%

- Logiciel

P. Walter (LAMS), P. Sarrazin (SETI)

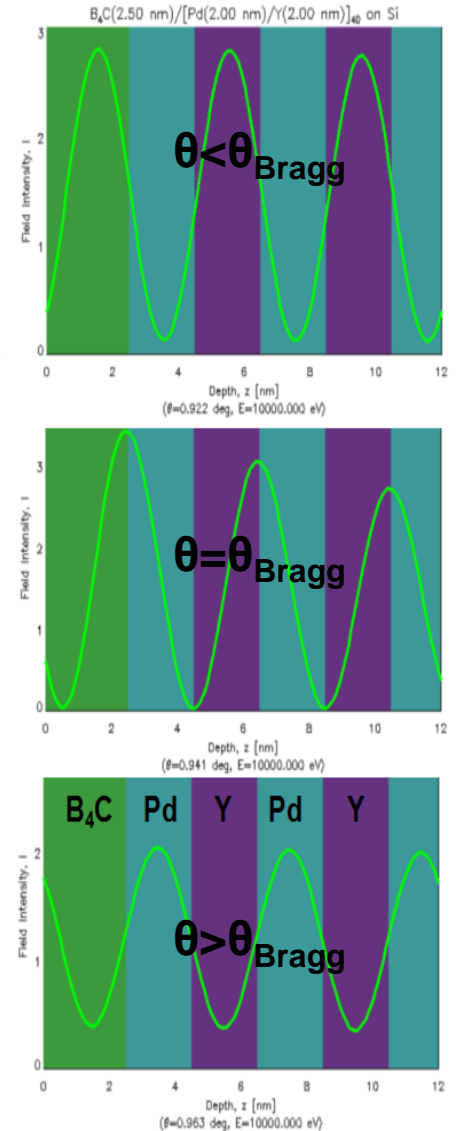
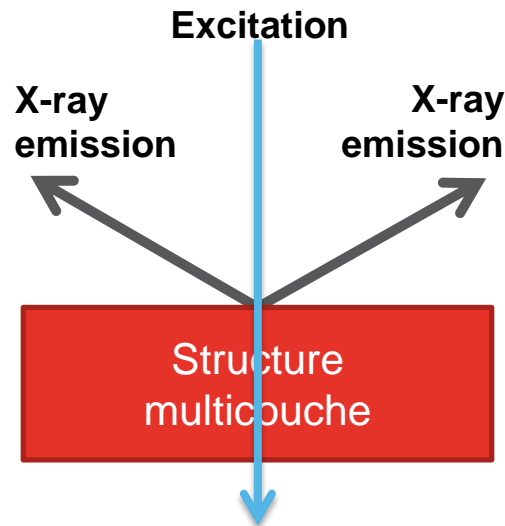


2

APPLICATION À LA DIFFRACTION DE KOSSEL

Application à la diffraction de Kossel (GEXRF)

- **Principe de la diffraction de Kossel**
 - Génération de rayons X caractéristiques
 - Interférence entre les faisceaux émis
 - Diffraction par la structure multicouche sous un angle de détection donné (Bragg pour une structure périodique)
 - Etude de films minces
 - Excitation
 - Protons
 - Rayons X
 - Electrons

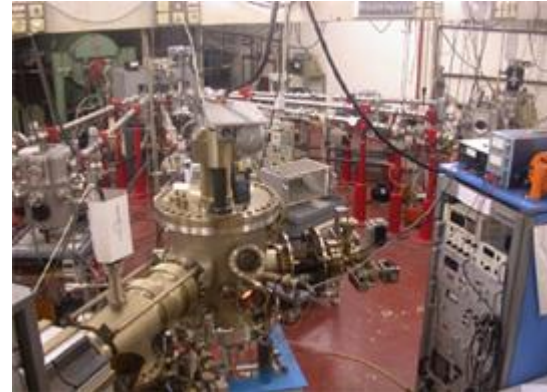


Distribution en profondeur
du champ électrique

Application à la diffraction de Kossel (GEXRF)

- **Plateforme SAFIR (système d'analyse par faisceau d'ions rapides) – INSP – Paris**

Accélérateur
ouvert



Hall
expérimental

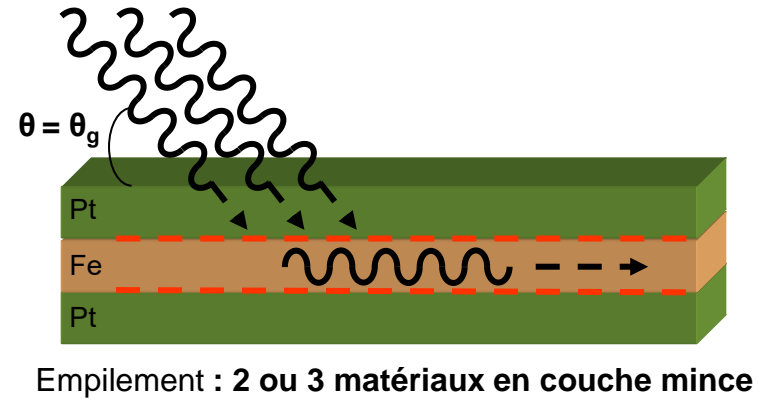
- Accélérateur d'ions positifs Van de Graaff
- ions monochargés monocinétiques: **H+**, D+, He+, C+, N+, O+
- Energie: 100 keV à 2,5 MeV, généralement entre **1 et 2 MeV**
- Courant: 1 nA à qq μ A
- Dimension du faisceau: 0,5 à 2 mm
- PIXE, RBS, MEIS, NRA, ERDA, canalisation, ...

Application à la diffraction de Kossel (GEXRF)

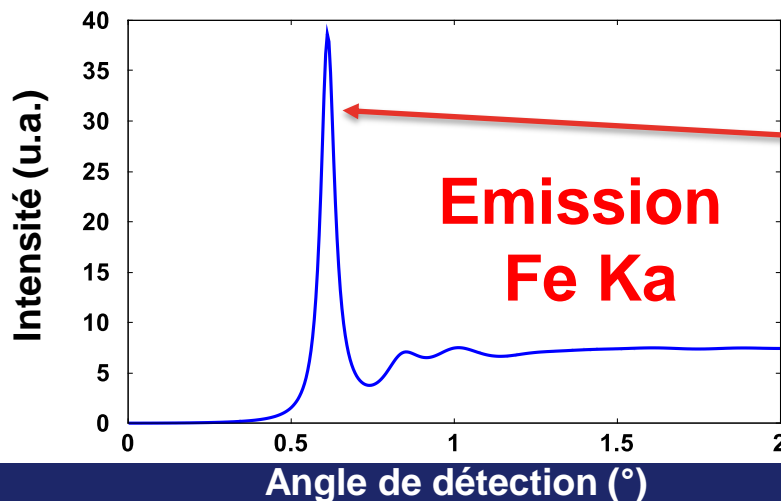
• Etude d'un guide d'onde Pt/Fe/Pt

Guide d'onde **planaire**

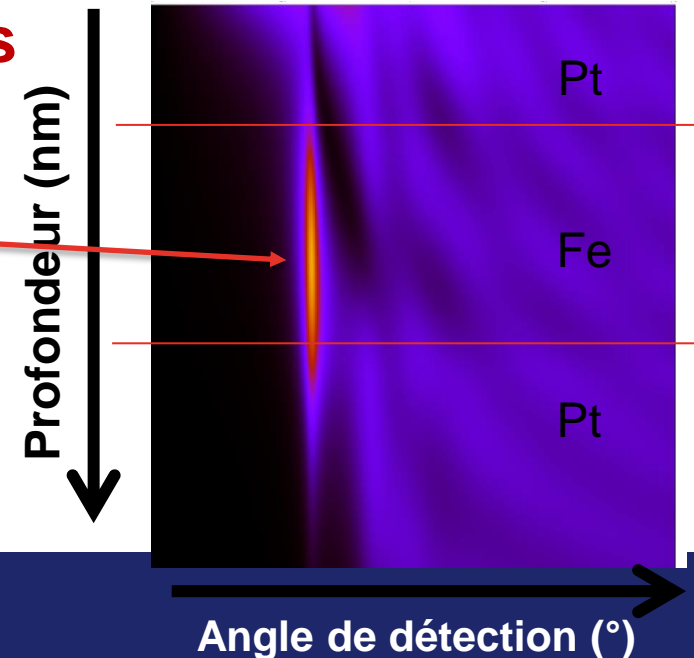
- Un matériau « léger » entre deux matériaux « lourds »
- Réflexion totale



• Courbe de Kossel: observation de la distribution angulaire du rayonnement caractéristique émis



Distribution du champ électrique

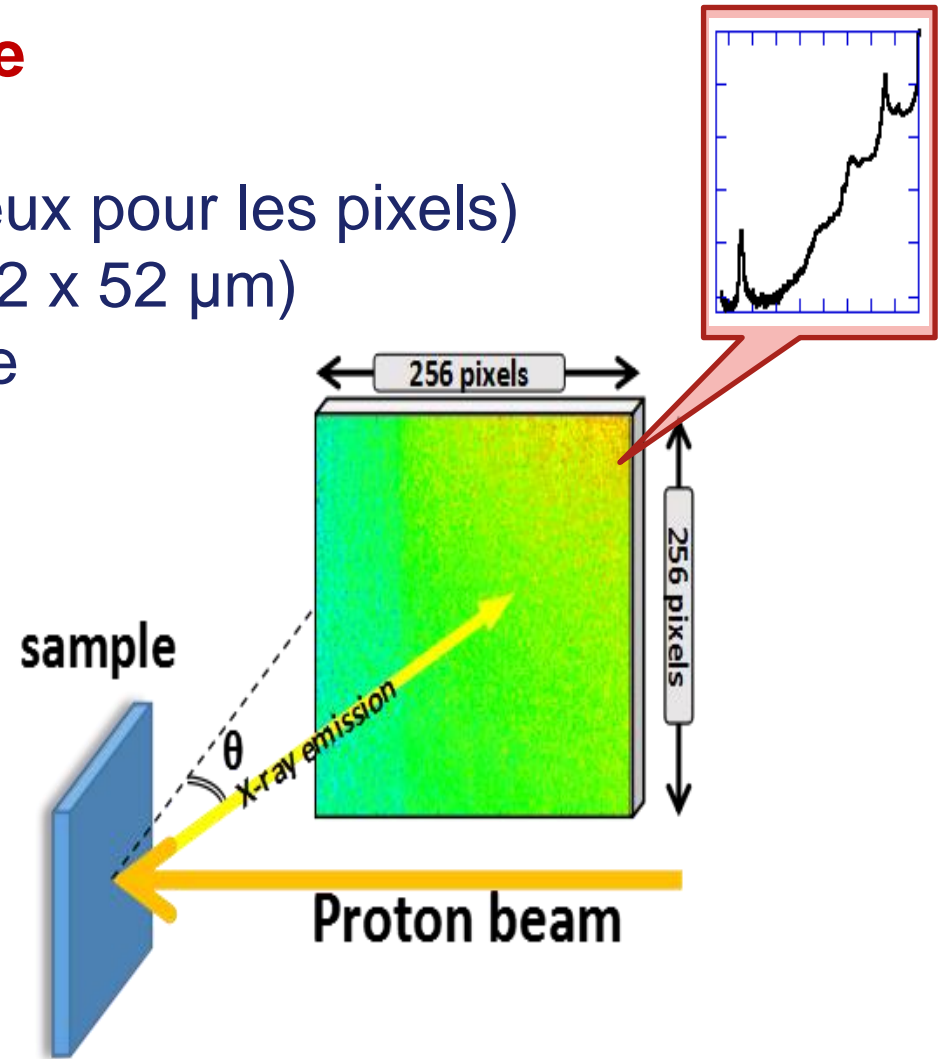
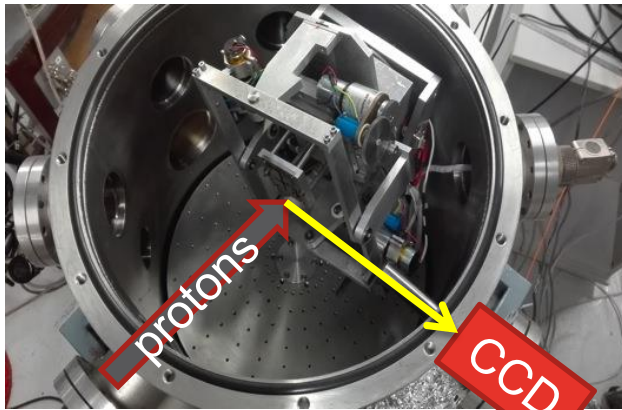


Application à la diffraction de Kossel (GEXRF)

- **Procédure expérimentale**

- Filtre Be (protons dangereux pour les pixels)
- Bining 256 x 256 pixels (52 x 52 μm)
- Pas de balayage angulaire
- Acquisition "rapide", 2h

**Chaque pixel
donne un spectre**



Application à la diffraction de Kossel (GEXRF)

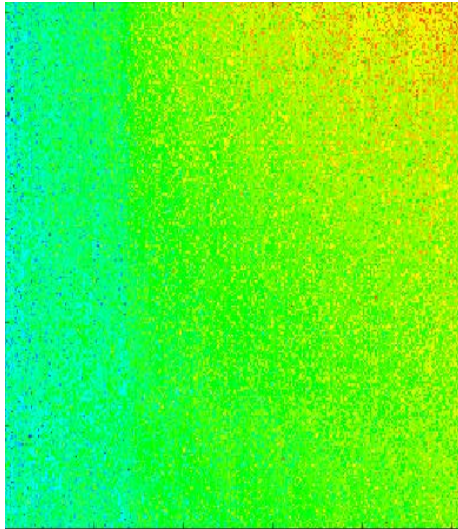
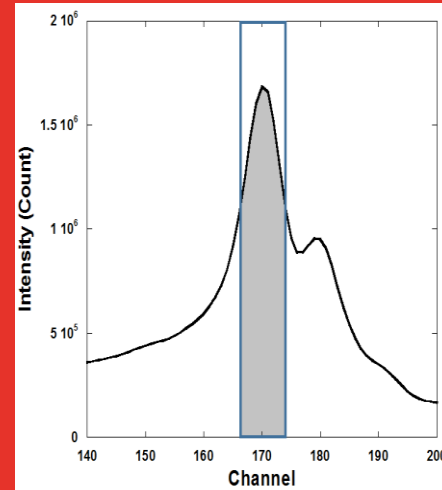


Image d'intensité totale



Sélection d'une gamme spectrale
(émission caractéristique)

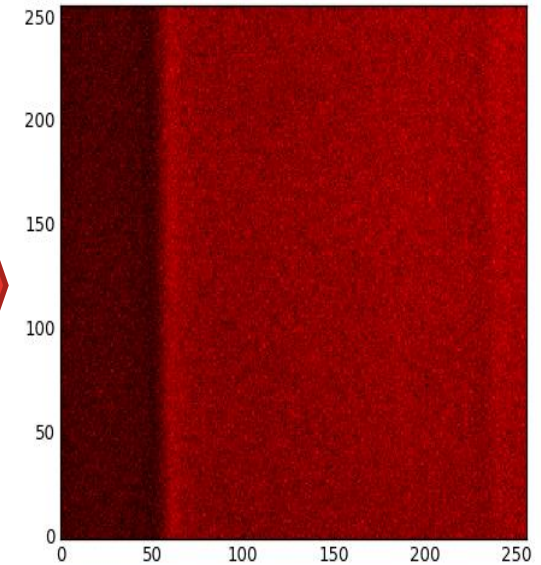
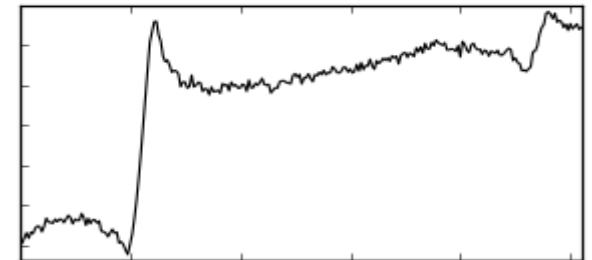


Image spectrale

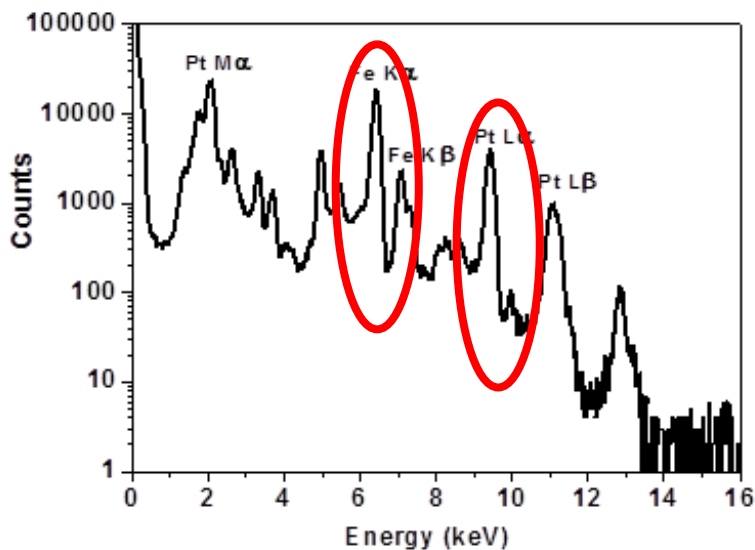
Intégration
des
colonnes

Courbe de Kossel
Distribution angulaire de l'intensité
d'une émission caractéristique



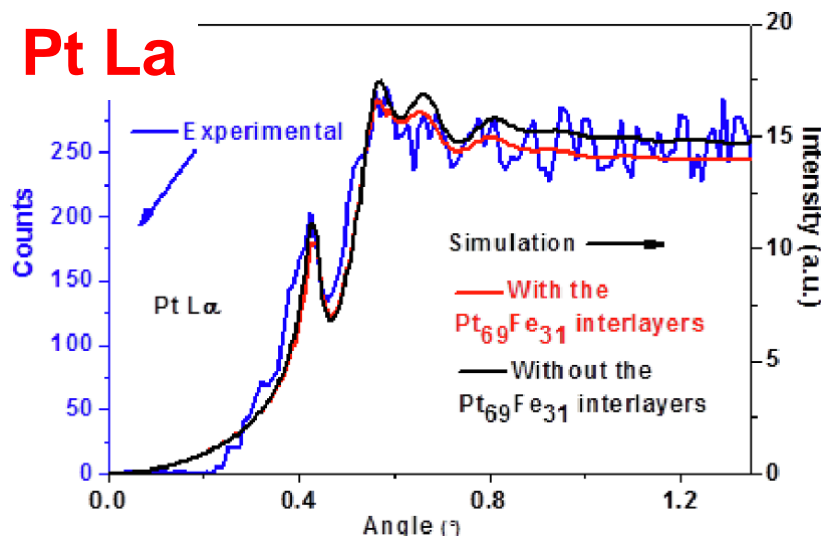
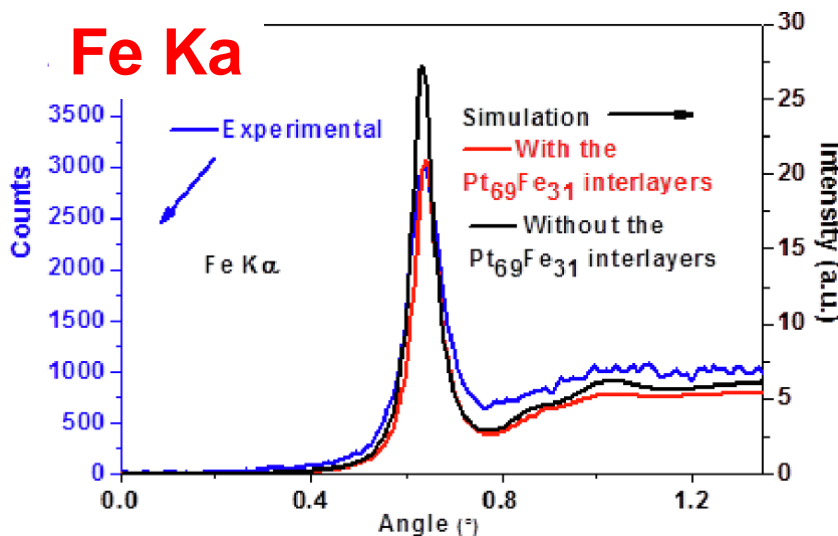
Angle de détection

Application à la diffraction de Kossel (GEXRF)

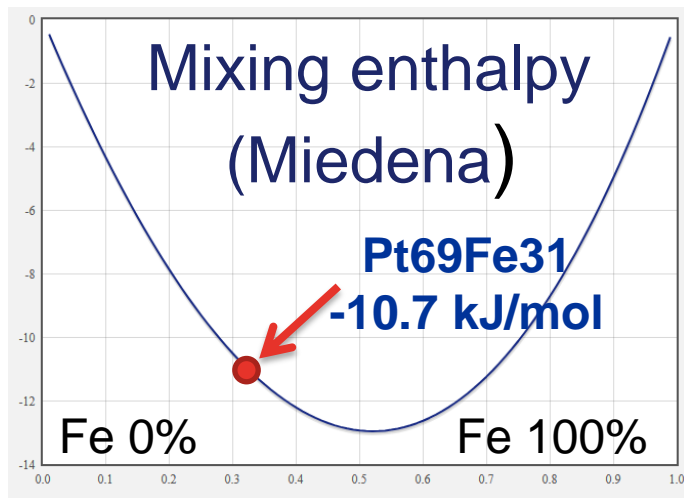


Spectre X du guide d'onde **Pt/Fe/Pt**
Emissions Fe Ka, Pt La

Courbes de Kossel

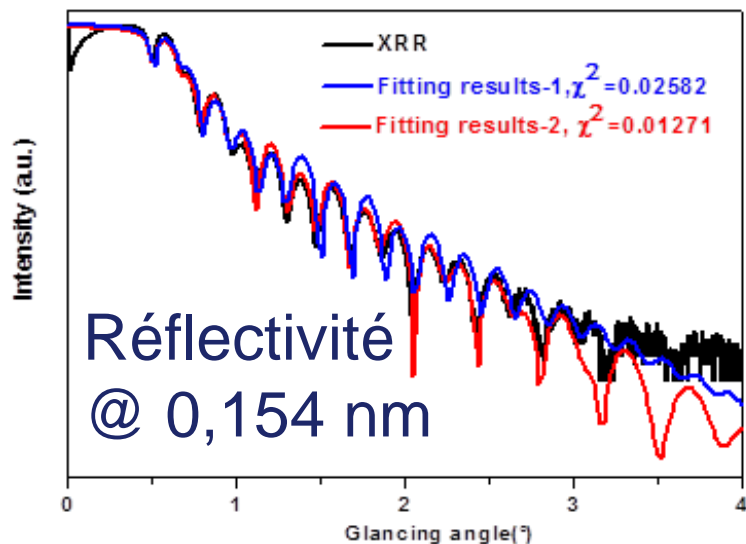


Application à la diffraction de Kossel (GEXRF)



Structure à 5 couches
Pt / PtFe / Fe / PtFe / Pt

	Epaisseur / Rugosité (nm) (±0.05 nm)	Densité (g/cm ³)
Pt	3.83 / 0.57	massif
Pt ₆₉ Fe ₃₁	1.62 / 0.90	16 ± 2
Fe	5.19 / 1.20	massif
Pt ₆₉ Fe ₃₁	1.41 / 0.79	16 ± 2
Pt	10.25 / 0.39	massif
Si substrat	- / 0.50	massif



Interfaces PtFe
 ≈1,5 nm

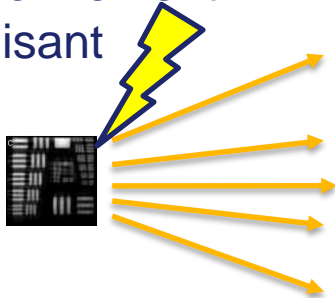
3

AUTRE UTILISATION?

Autre utilisation: imagerie spectrale

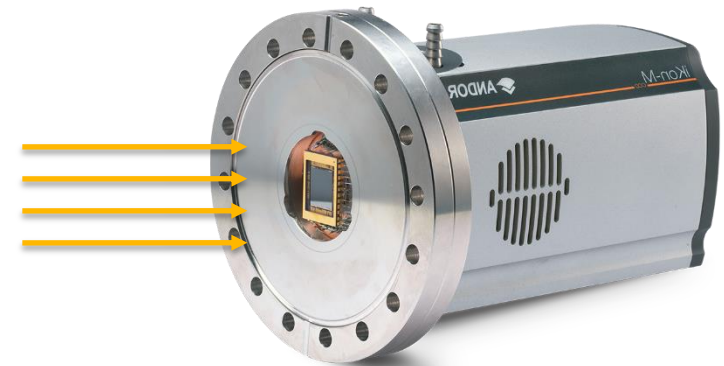
- **Imagerie plein champ en fluorescence X (FF-XRF)**
- Faire de l'imagerie spectrale sans balayage
- Emission X caractéristique isotrope
- Nécessité de mettre une optique entre l'échantillon émetteur et le détecteur (camera CCD)

Source de rayonnement ionisant



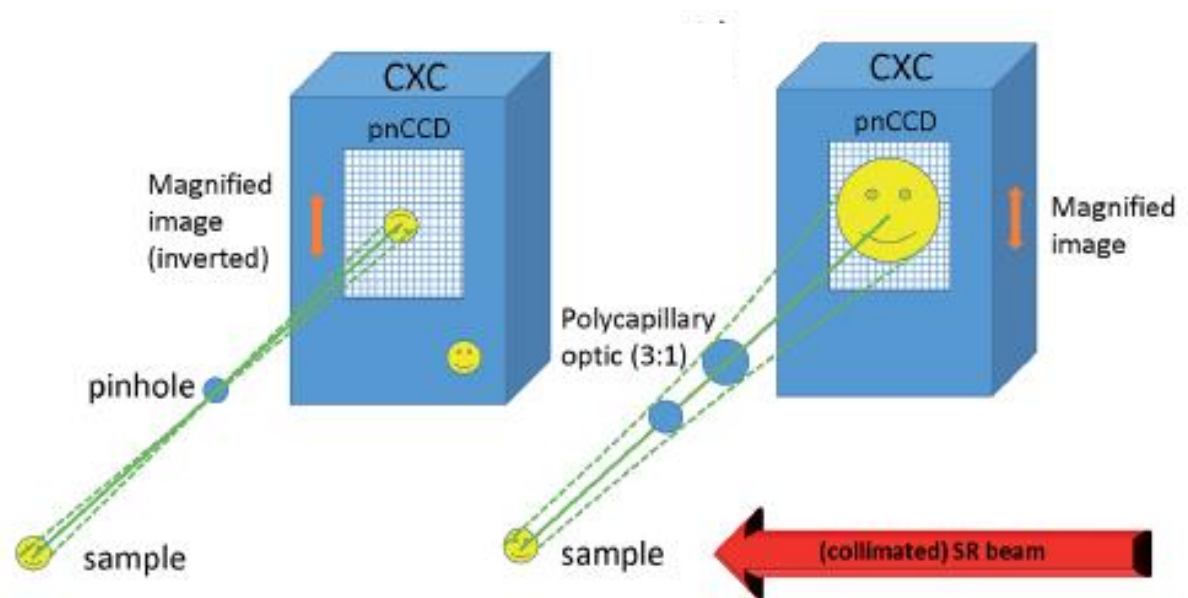
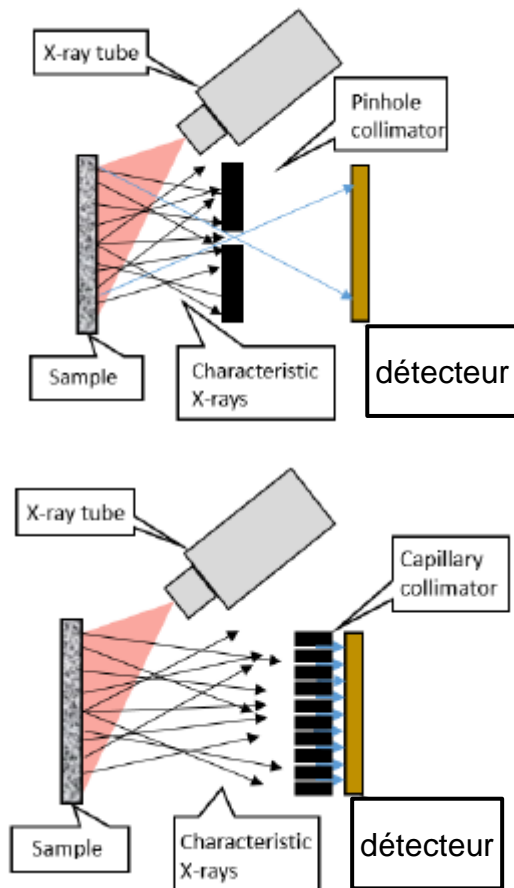
Optique

- Sténopé (pinhole, camera obscura)
- Polycapillaire
- Optique micro-pore (MPO)
- Masque codé
- ...



Autre utilisation: imagerie spectrale

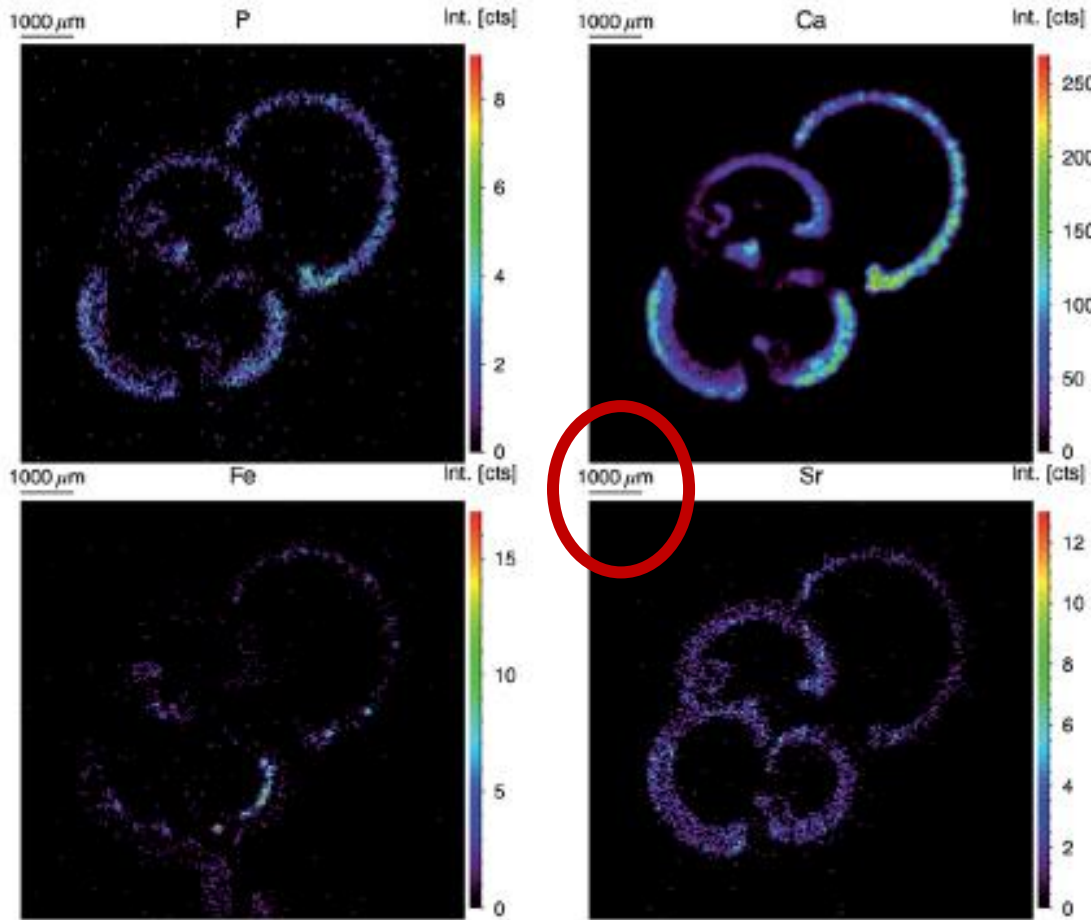
• Sténopé et polycapillaire



J. Instrum. 15, P12033 (2020)
JAAS 34, 2083 (2019)

Autre utilisation: imagerie spectrale

• Exemple avec un polycapillaire



Foraminifera

Distributions élémentaires de P, Ca, Fe et Sr

660 s

6 : 1 polycapillaire grossissant

excitation à 18.2 keV

JAAS 34, 2083 (2019)

Kossel interferences of proton-induced x-ray emission lines in periodic multilayers, M.-Y. Wu et coll. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B**386**, 39-43 (2016) (<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2016.09.014>) <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01374375>

Kossel diffraction observed with X-ray color camera during PIXE of nano-scale periodic multilayer M.-Y. Wu, K. Le Guen, J.-M. André, P. Jonnard, I. Vickridge, D. Schmaus, E. Briand, P. Walter, Q.-S. Huang, Z.-S. Wang NIM B**450**, 252-256 (2019) (<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.08.008>) <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02162011v1>

Kossel effect in periodic multilayers, K. Le Guen et coll. J. Nanosci. Nanotechnol. **19**, 593-601 (2019) (<https://dx.doi.org/10.1166/jnn.2019.16472>) <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01909419>

Kossel interferences of proton-induced X-ray emission lines to study thin film waveguides J.-P. Zhang, C. Pendenque, K. Le Guen, R. Delaunay, I. Vickridge, D. Schmaus, Q.-G. Fu, P. Jonnard NIM B**452**, 12-20 (2019) (<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.05.053>) <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02142094>



K. Le Guen
I. Ismail
R. Benbalagh
R. Vacheresse
Zhang J.-P.
Wu M.-Y.
R. Delaunay

I. Vickridge
E. Briand
D. Schmaus
P. Walter
Y. Zheng

MERCI



The imager is operated in **single-photon counting mode**, i.e., the CCD is exposed and read often enough that nearly all pixels record either the charge deposited by a single X-ray photon added to their dark current accumulation, or only the dark current accumulation representing no incident photons.