

Quel DéTECTeur pour quelle imagerie X

Kadda Medjoubi



Sommaire

I. L'imagerie par rayons X au synchrotron

- I. Le synchrotron
- II. L'imagerie X
 - I. Plein champ
 - II. Diffraction cohérente
 - III. Multimodale par balayage rapide

II. Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

- I. Définition et mesures des figures de mérite
- II. Caractérisation détecteurs:
 - I. Caméra X pour la tomographie X
 - II. XPAD

III. Développements et applications en imagerie X au synchrotron Soleil

- I. Imagerie X couleur avec le XPAD
- II. Applications de l'imagerie X multimodale
- III. Evaluation de la ptychographie

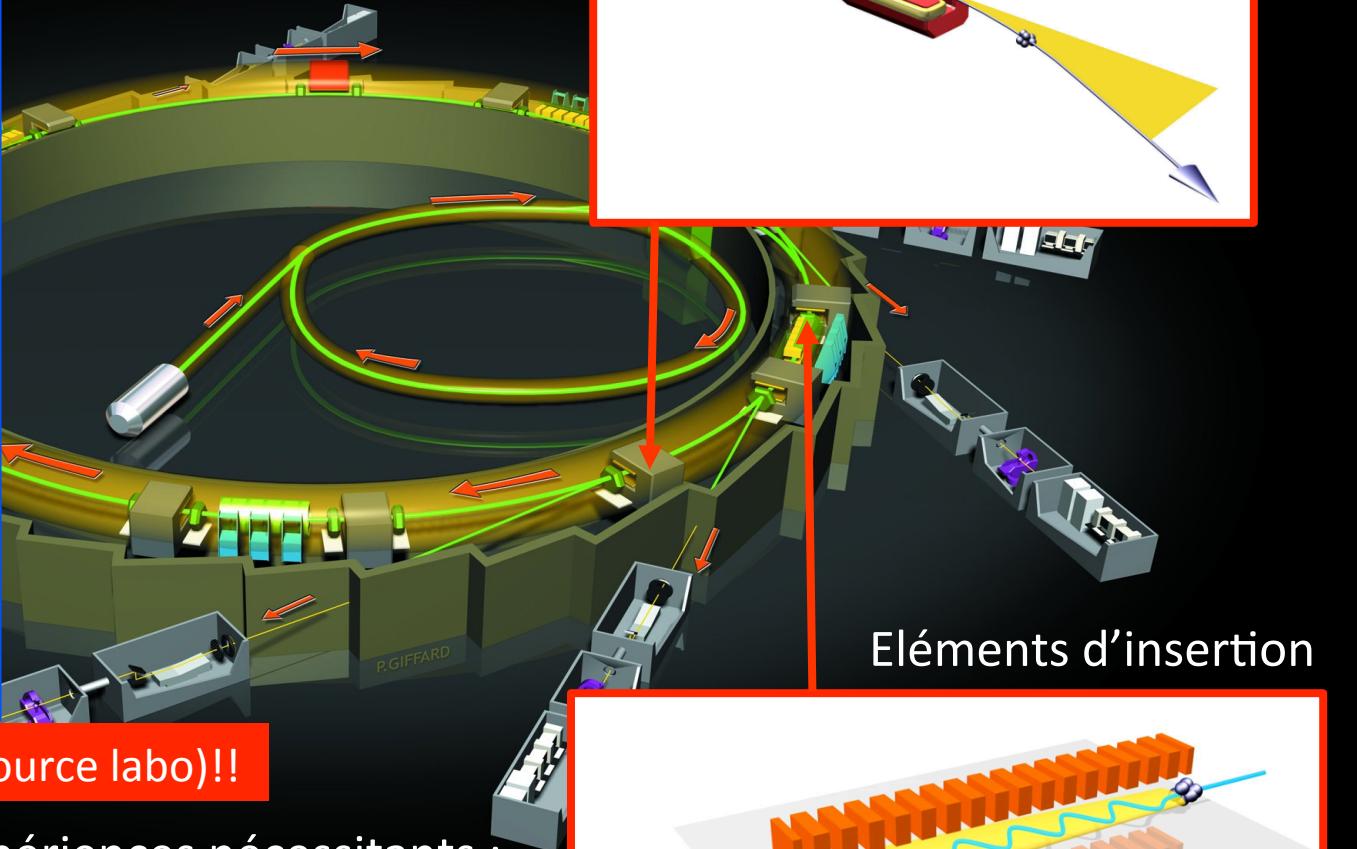
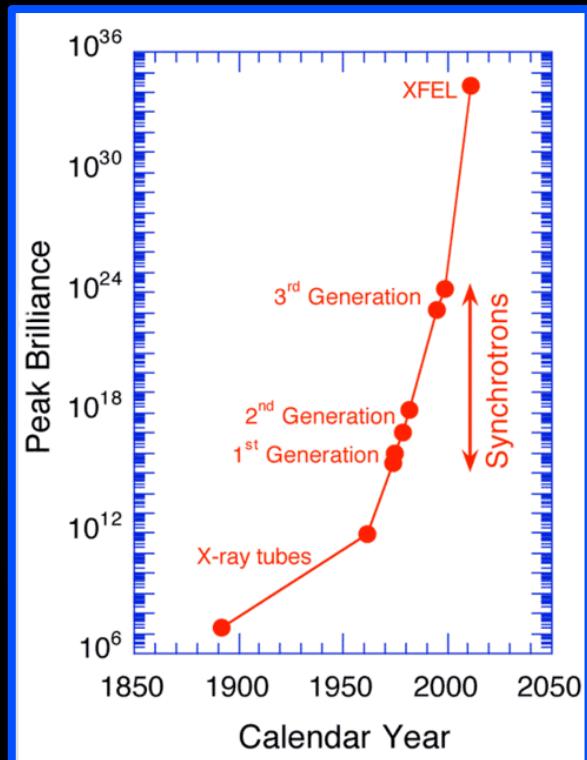
I. L'imagerie par rayons X au synchrotron

Le synchrotron

Source de rayonnement intense de l'IR lointain aux X-durs

Aimant de courbure

Brillance = Flux / taille source / Ω



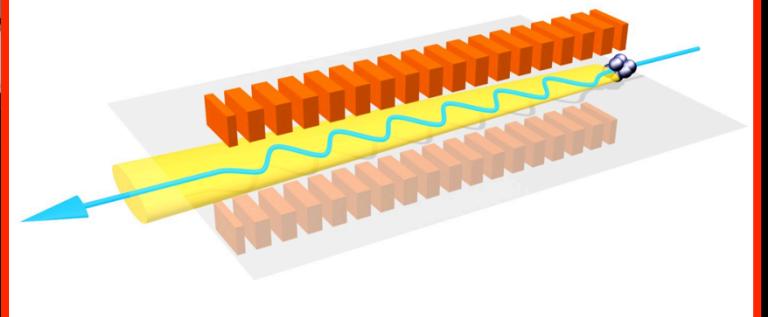
forte brillance $> 10^{10} \times$ brillance (source labo)!!

Source nécessaire pour expériences nécessitant :

- Haut flux faisceau monochromatique

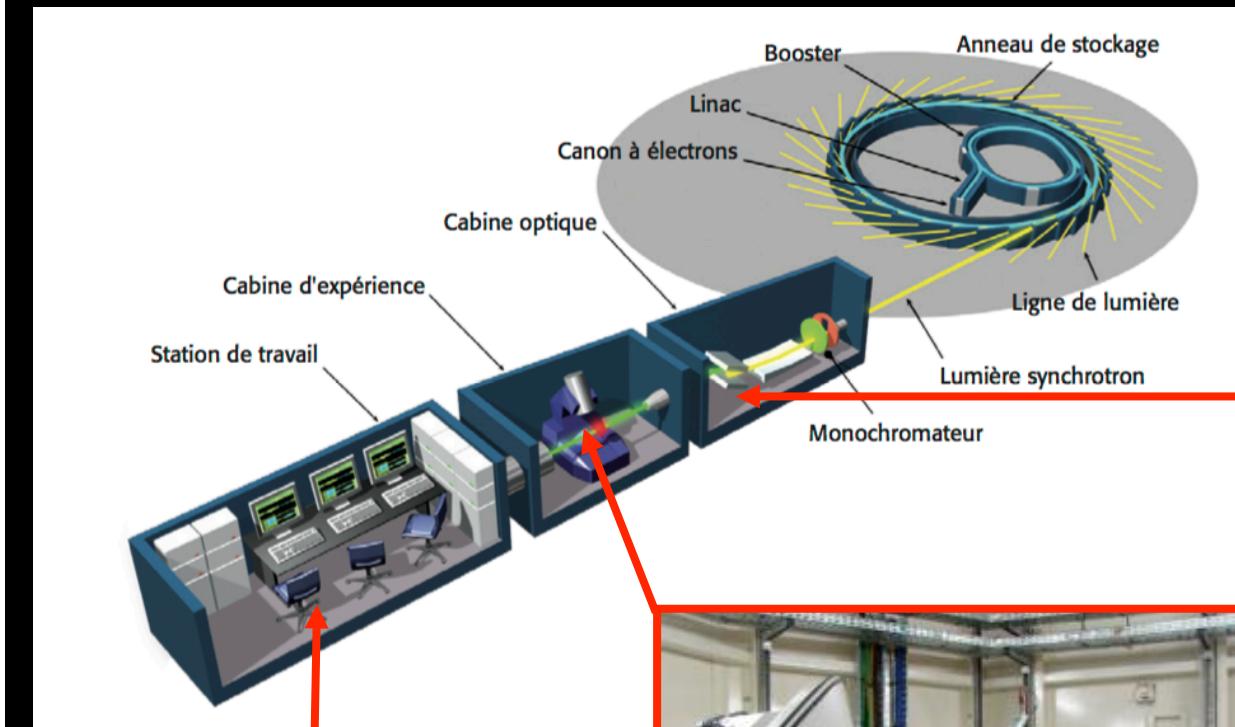
Et/ou

- Cohérence



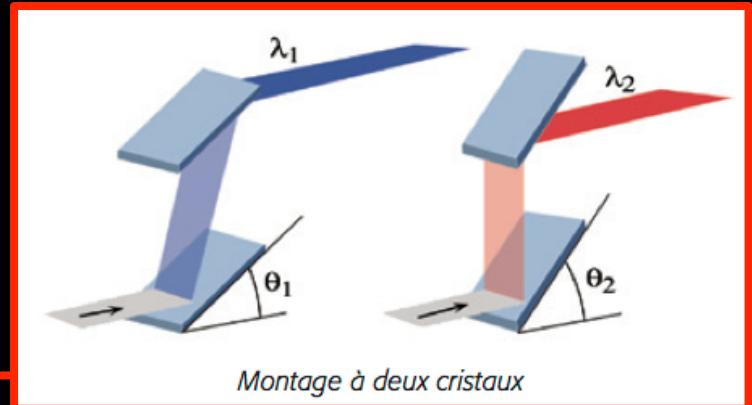
Le synchrotron

Une ligne de lumière

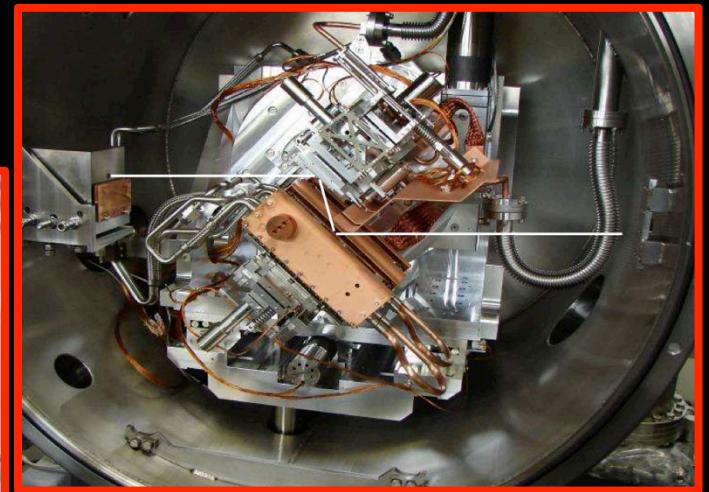


Salle de pilotage

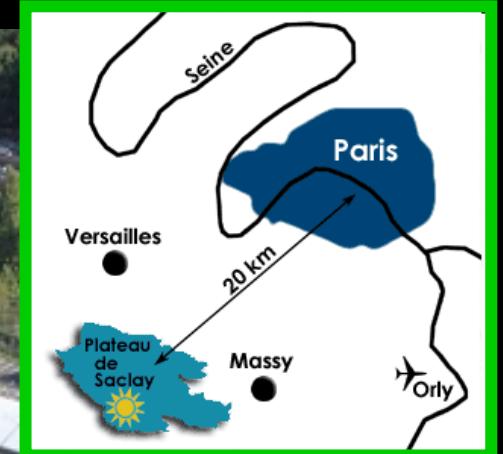
Monochromateur



Station expérience

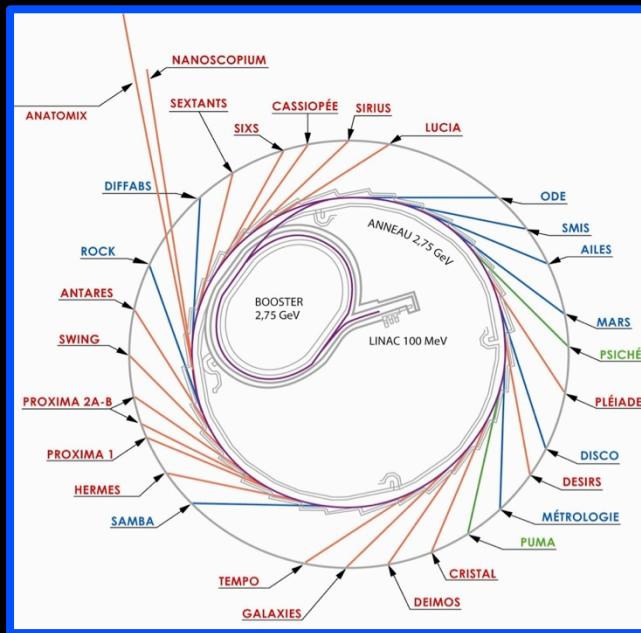


Le synchrotron Soleil



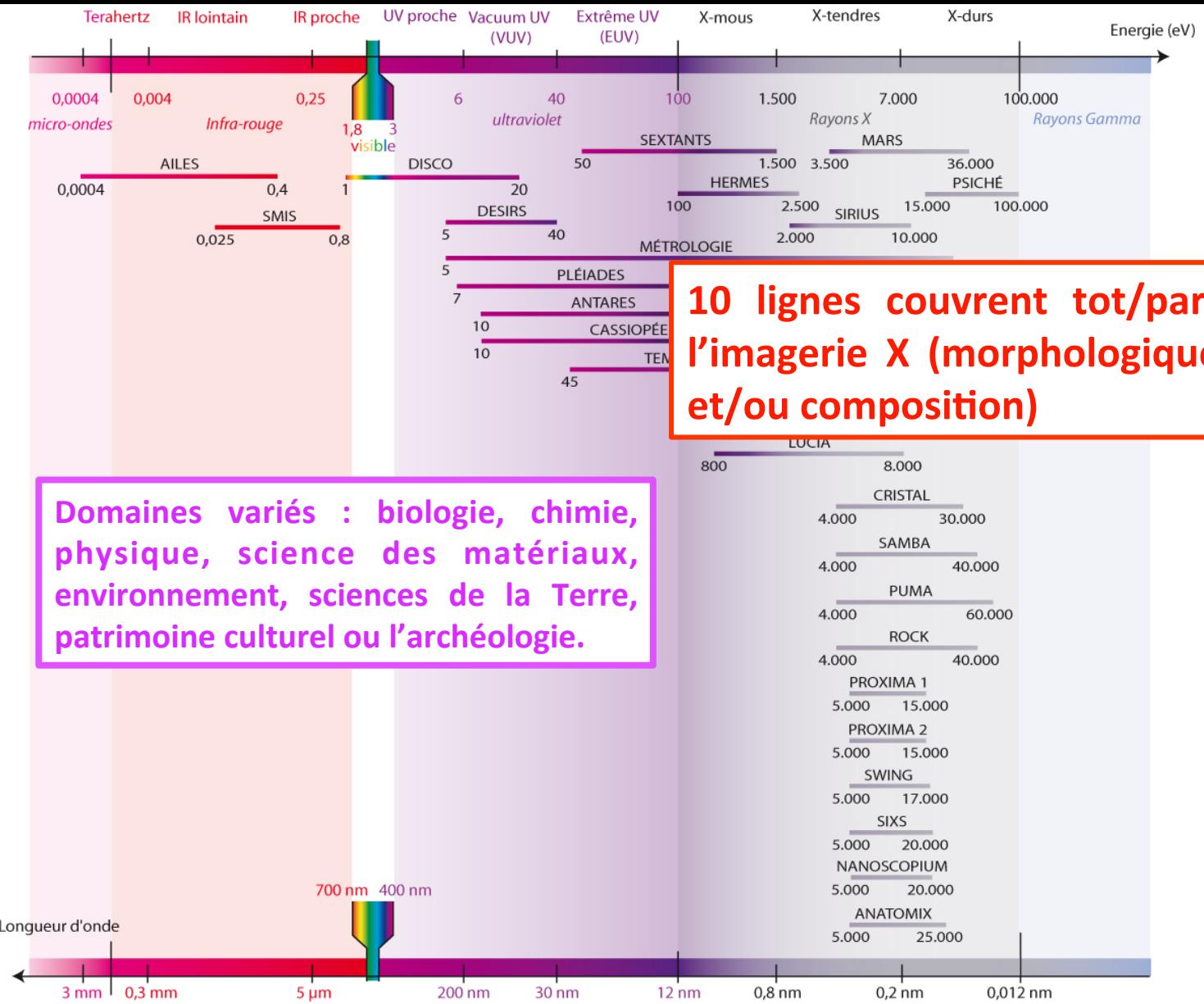
Main parameters of Soleil

- Machine Energy : 2.75 GeV
- Ring circumference : 354 m
- Current : 500 mA



29 lignes de lumière
24 en fonctionnement
43 emplacements

Le synchrotron Soleil

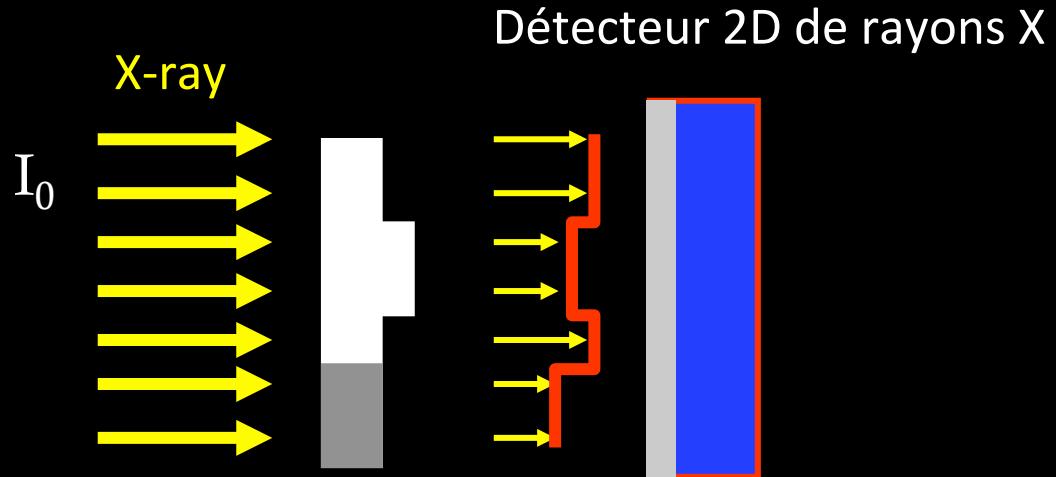


Domaines variés : biologie, chimie, physique, science des matériaux, environnement, sciences de la Terre, patrimoine culturel ou l'archéologie.

LUCIA : XAS, microscopie X, fluo X
ODE : XAS (dispersif), XMCD
SMIS : microscopie IR, spectroscopie IR
AILES : spectroscopie IR, THz
MARS : XAS, fluo X, XRD, SAXS – sur matériaux radioactifs
PSICHÉ : XRD, tomographie (absorption) - haute P et T
PLEIADES : XPS, absorption VUV-X mous
DISCO : microscopie UV-visible, spectroscopie UV, fluo UV, dichroïsme UV
DESIRS : absorption UV-VUV, dichroïsme VUV
MÉTROLOGIE : diffusion, XRD
PUMA : XAS, XRD, microscopie X, tomographie, fluo X
CRISTAL : XRD – matière condensée
DEIMOS : XMCD
GALAXIES : diffusion X inélastique, XPS haute énergie
TEMPO : XAS, XPS résolue en temps, XMCD / XMCD
SAMBA : XAS, Raman
HERMES : microscopie X mous, XPS
PROXIMA1 : XRD - biocristallographie
PROXIMA2 : XRD – biocristallographie
SWING : SAXS
ANTARES : XAS, microscopie, XPS résolue en angle, échelle nm
ROCK : XAS
DIFFABS : XRD, XAS, fluo X
ANATOMIX : microscopie X, tomographie (contraste de phase), échelle nm
NANOSCOPIUM : XAS, fluo X, microscopie X échelle nm
SEXTANTS : XAS, XRD, diffusion X résonante
SIXS : SAXS et XRD – surfaces et interfaces
CASSIOPEE : XAS, XPS résolue en angle, en énergie, en spin
SIRIUS : XRD, SAXS en incidence rasante

L'imagerie par rayons X

L'imagerie plein champ d'absorption



Variation d'absorption

$$Att(x) = \ln\left(\frac{I_0(x)}{I(x)}\right) = \int \mu(x, y)dy$$

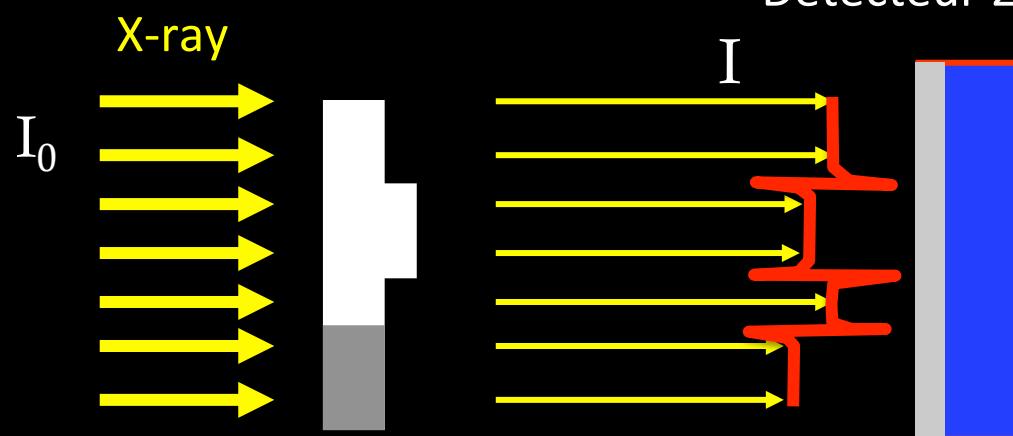
Imagerie d'absorption au synchrotron doit se faire au contact

Radiographie X médical



L'imagerie par rayons X

L'imagerie plein champ à contraste de phase



Détecteur 2D de rayons X

Décalage de phase à l'interface entre deux milieux ($\sim \mu\text{m}$) → Interférence (contr/destr)

$$z \sim d^2 / 2\lambda \rightarrow \text{dizaine de cm à 12 keV}$$

Rehausse le contraste $\times 100$ (min) comparé au contraste d'absorption

Sur une ligne synchrotron :

- Petite taille de source
- Longue distance source – échantillon

→ Cohérence partielle

Détecteur 2D de rayons X



- Haute résolution spatiale (taille pixel micron - submicron)
- Champ de vue $\sim 5 \text{ mm}^2$ ($> 2000 \times 2000$ pixels)
- Résistant au faisceau direct synchrotron (10^{12} à $10^{13} \text{ ph/s/mm}^2$)



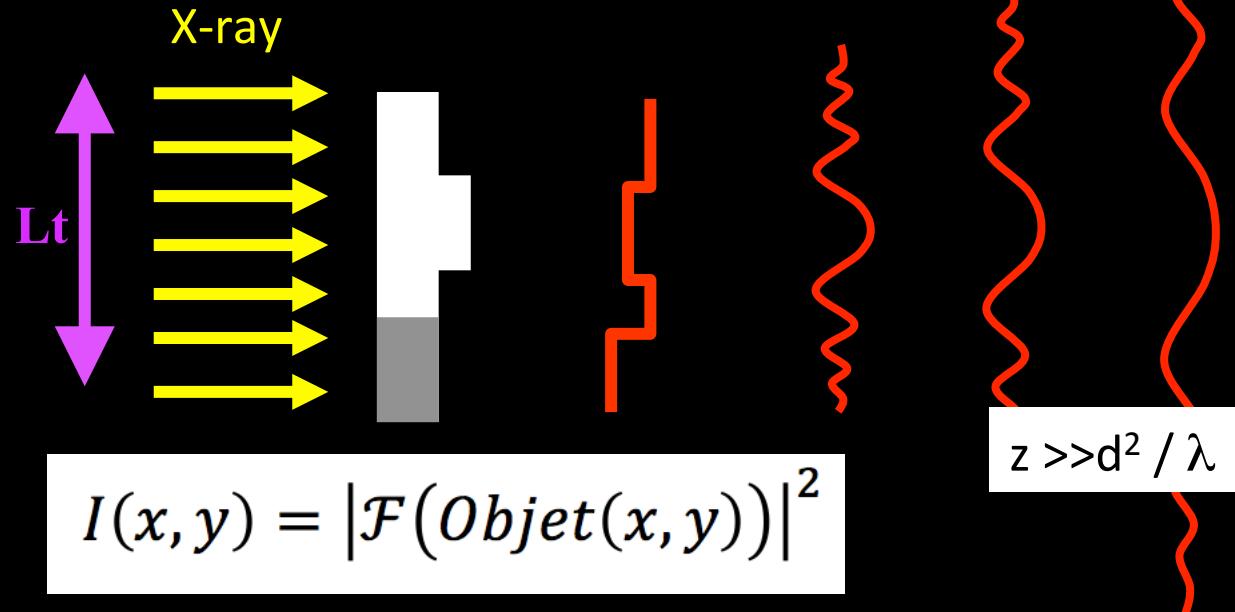
ESRF Grenoble and UMR CNRS 6118 Rennes

Détecteur à conversion indirect (scintillateur + optique + caméra CCD ou Scmos)

L'imagerie par rayons X

L'imagerie par diffraction cohérente

Imagerie à une échelle de qq 10 nm



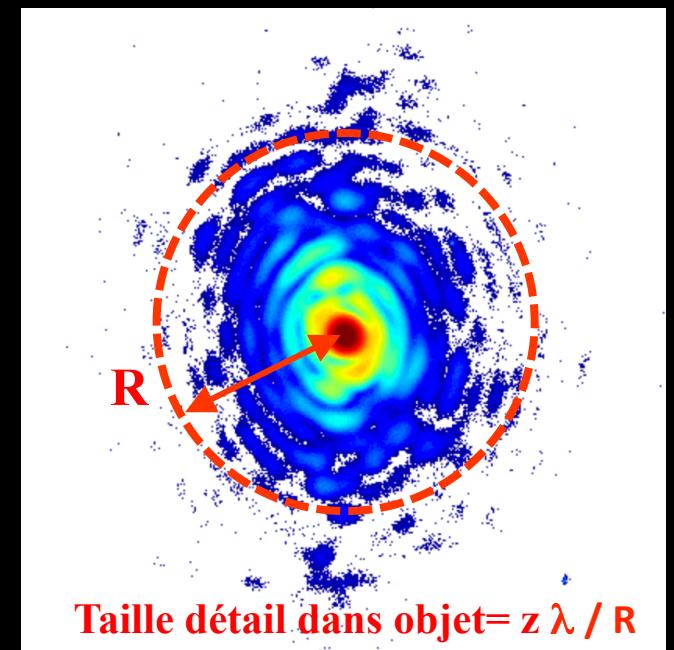
Méthode d'inversion itérative (phase retrieval) pour CDI , scanning CDI (Ptychographie)

Détecteur 2D de rayons X



- Sensible au photon unique (événements aux grands angles)
- Champ de vue $> 1000 \times 1000$ pixels

Imagerie « champ lointain »

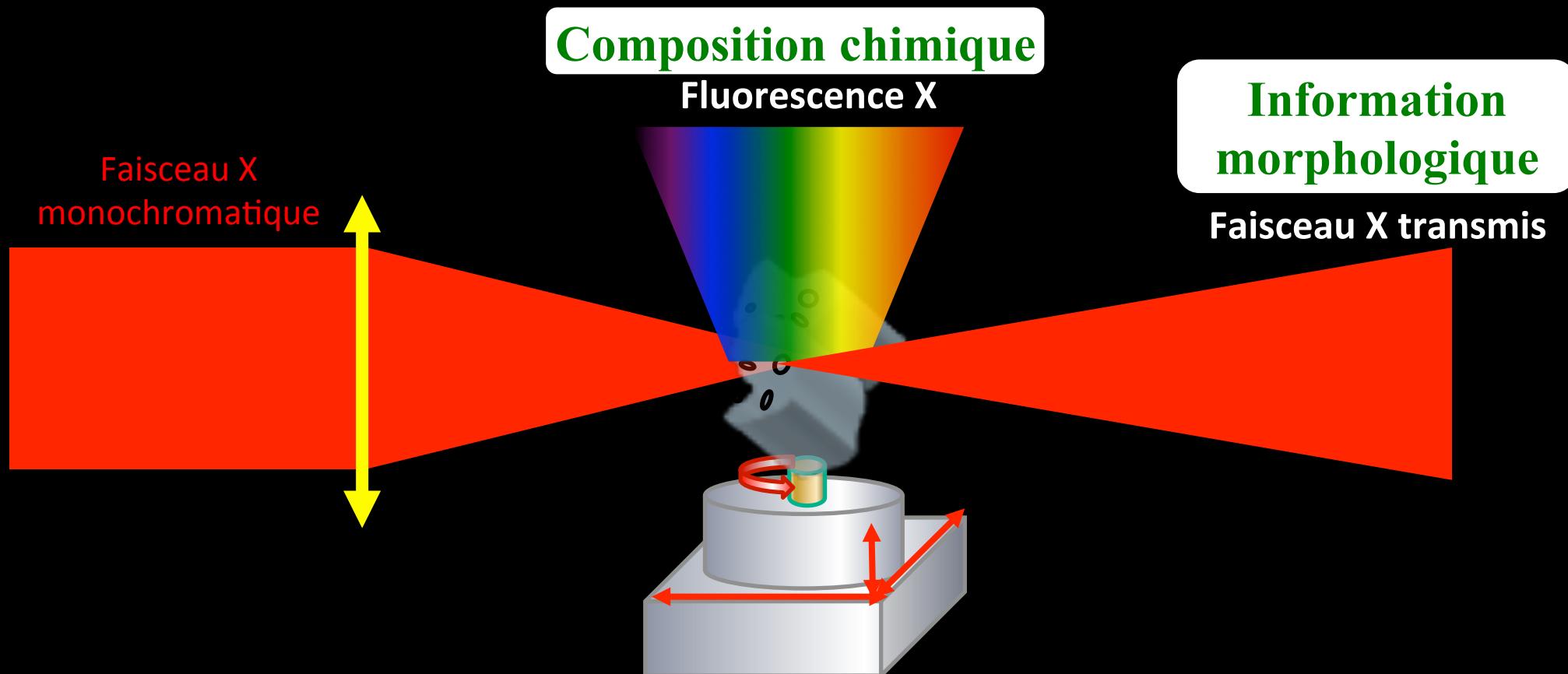


Détecteurs pixels à comptage de photons

Pixel de 100 μm , 1000 x 1000 pixels, 12 keV, $z=10\text{m}$, Objet de 10 μm de diam
→ Taille pixel objet = 50 nm

L'imagerie par rayons X

L'imagerie Multimodale par balayage



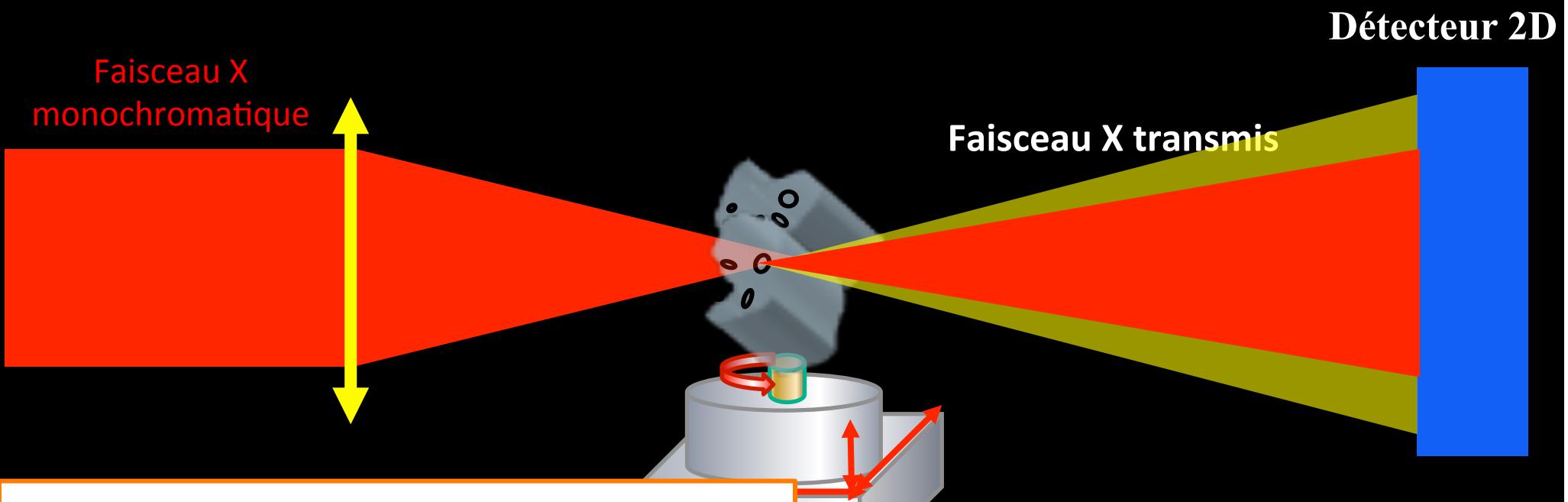
L'imagerie par rayons X

L'imagerie Multimodale

Information morphologique

Absorption :

- Intensité total du faisceau transmis
- Peu efficace pour des échantillons constitués d'éléments légers (faible Z)



Phase :

- Réfraction du faisceau (déphasage)
- Sensible pour des échantillons constitués d'éléments légers (faible Z)

Dark Field (diffusé):

- Intensité totale diffusé
- Structure granulaire

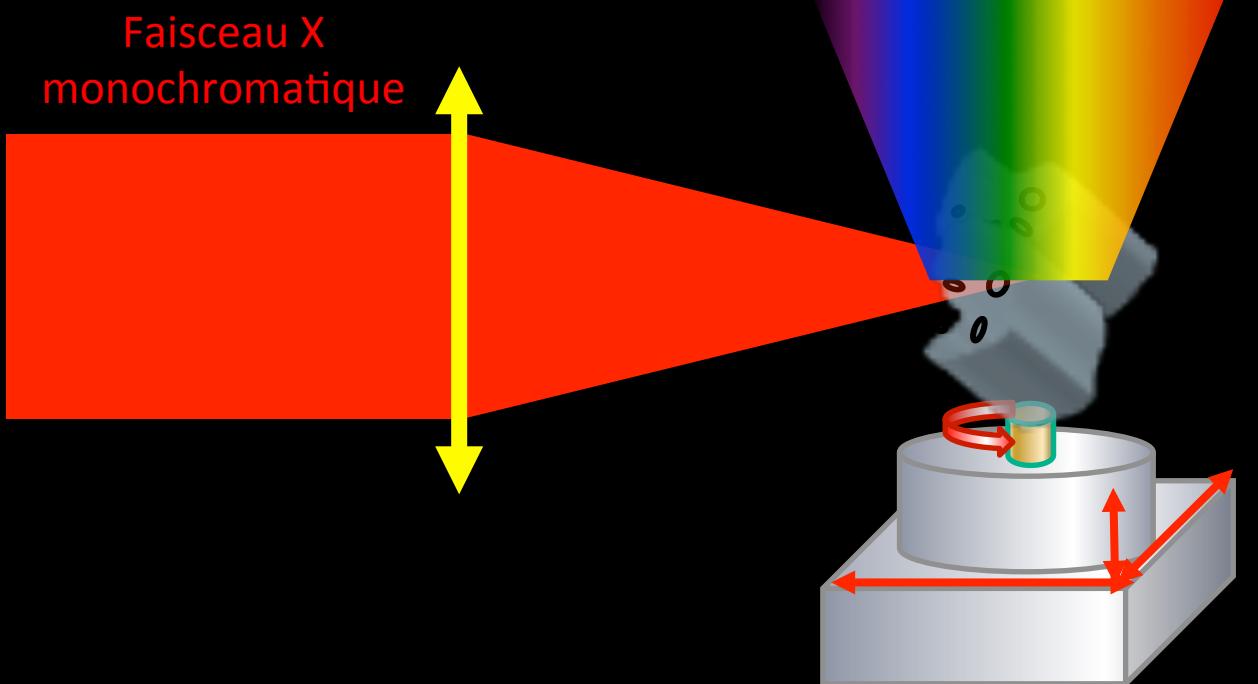
L'imagerie par rayons X

L'imagerie Multimodale par balayage

Composition chimique

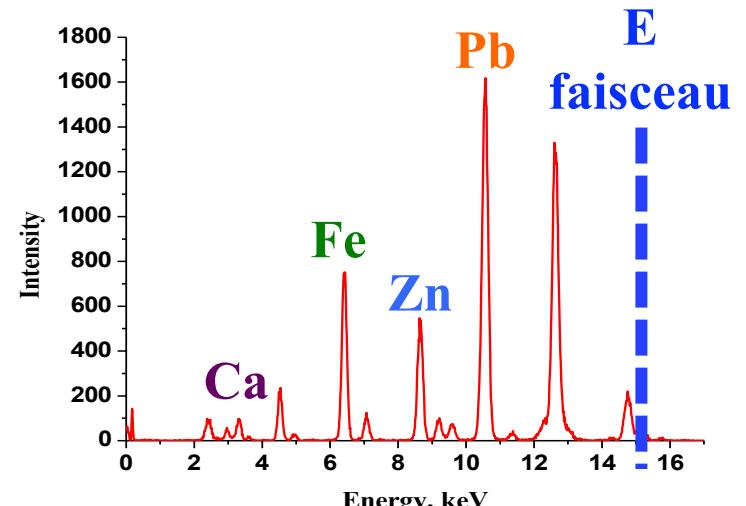
DéTECTEUR résolu en énergie

Fluorescence X



Intensité d'un pic

~nombre d'atome dans le volume,
analyse quantitative
concentration



L'imagerie par rayons X

L'imagerie Multimodale par balayage

Révolution dans l'acquisition (Spécifications issus de Nanoscopium)

Acquérir simultanément et rapidement (ms) les informations morphologiques et chimiques



Challenge technique

- Acquisition de plusieurs détecteurs en parallèle lors d'un déplacement continu de l'échantillon
- Traiter et stocker un grand volume de donnée



FLYSCAN

Développement d'un outil générique transposable sur différentes lignes

Autres applications : tomographie plein champ, Diffraction de poudre, bio-cristallographie, etc ...

Forte pression sur les performances d'acquisition des détecteurs 2D :

- fps 1kHz
- liens 10 Gbits

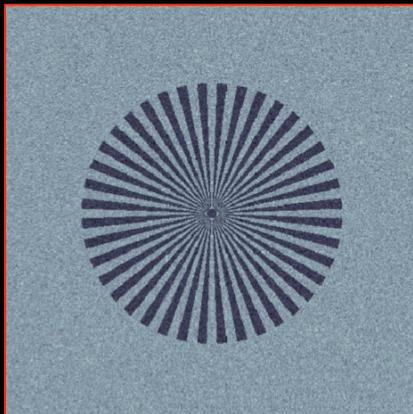
II. Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Objectifs

Optimiser le choix/paramétrage d'un détecteur 2D en fonction de l'expérience

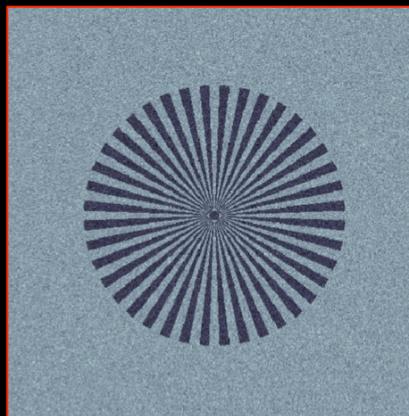
Entrée



Système d'imagerie parfait

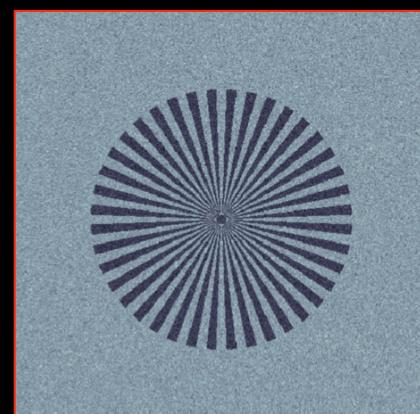


Sortie

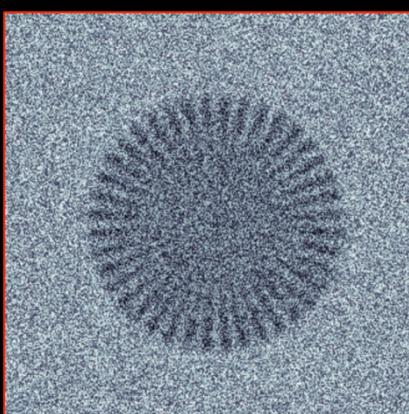


Reproduction à l'identique de l'image en entrée

Système d'imagerie réel



- Efficacité
- Dynamique
- Linéarité
- Elargissement spatial
- Echantillonnage spatial
- Bruit



- Contraste diminué
 - Bruit augmenté
- Signal/bruit diminué



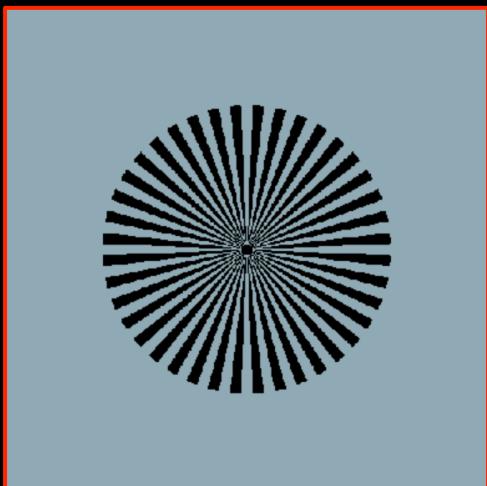
Cette dégradation se mesure par la MTF et la DQE

Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

MTF

La Fonction de Transfert de Modulation décrit la fidélité d'un système d'imagerie à reproduire le contraste incident

Entrée

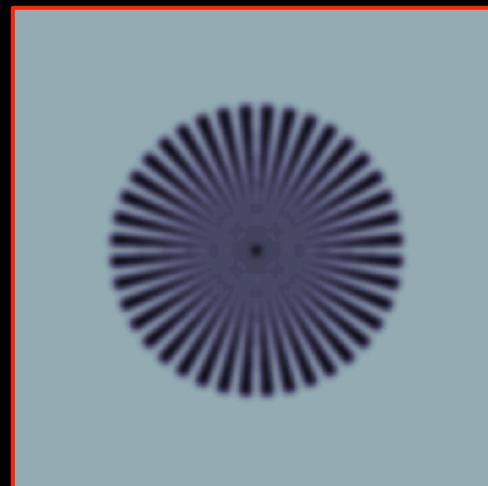


Système d'imagerie

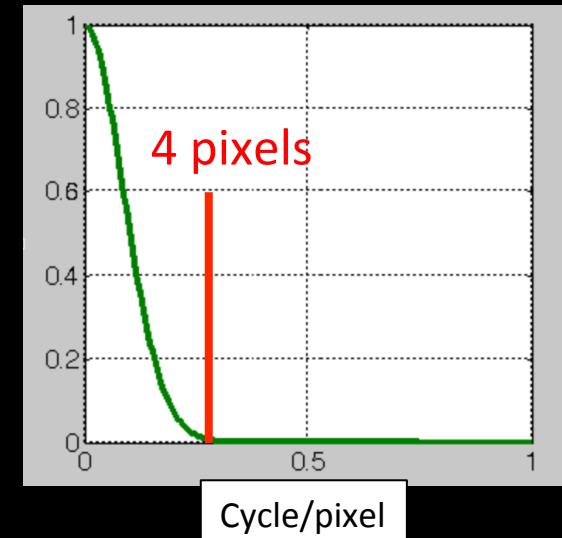


Réponse
impulsionnelle
Gaussienne

Sortie



MTF



Cycle/pixel

Dépendance avec la fréquence spatiale → $MTF = TF(\text{Réponse impulsionnelle})$

$$|\mathfrak{F}[S(x, y)](\nu_x, \nu_y)| \rightarrow |\mathfrak{F}[S'(x, y)](\nu_x, \nu_y)|$$

$$\Rightarrow \frac{|\mathfrak{F}[S'(x, y)]}{|\mathfrak{F}[S(x, y)]|}(\nu_x, \nu_y) = MTF(\nu_x, \nu_y)$$

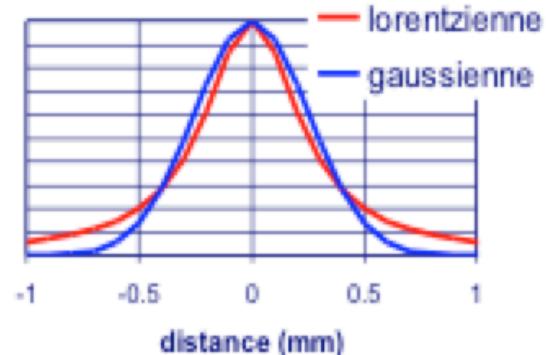
$$MTF(\nu_x, \nu_y) = \frac{|\mathfrak{F}[S(x, y) \otimes R(x, y)](\nu_x, \nu_y)|}{|\mathfrak{F}[S(x, y)](\nu_x, \nu_y)|} = |\mathfrak{F}[R(x, y)](\nu_x, \nu_y)|$$

Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

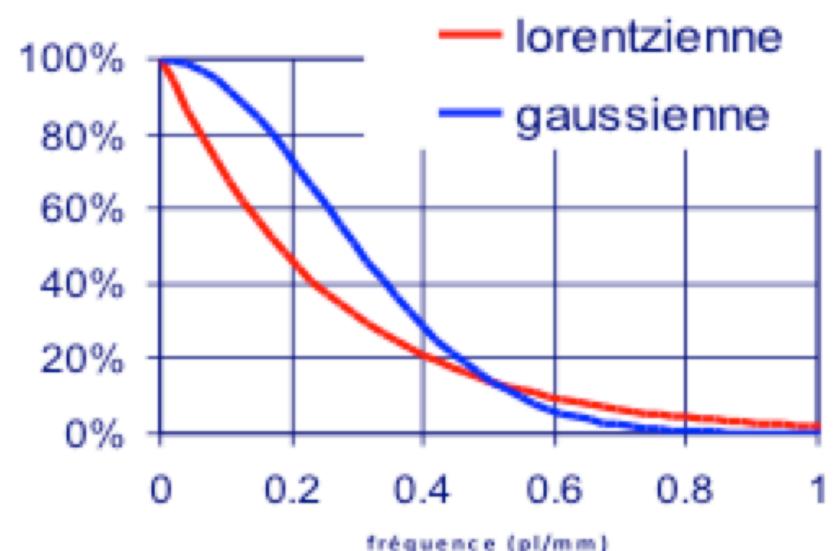
MTF

La Fonction de Transfert de Modulation décrit la fidélité d'un système d'imagerie à reproduire le contraste incident

Comparaison entre deux système d'imagerie



$$\sigma_{\text{Gauss}} = \sigma_{\text{Lorentzienne}} = 250 \mu\text{m}$$

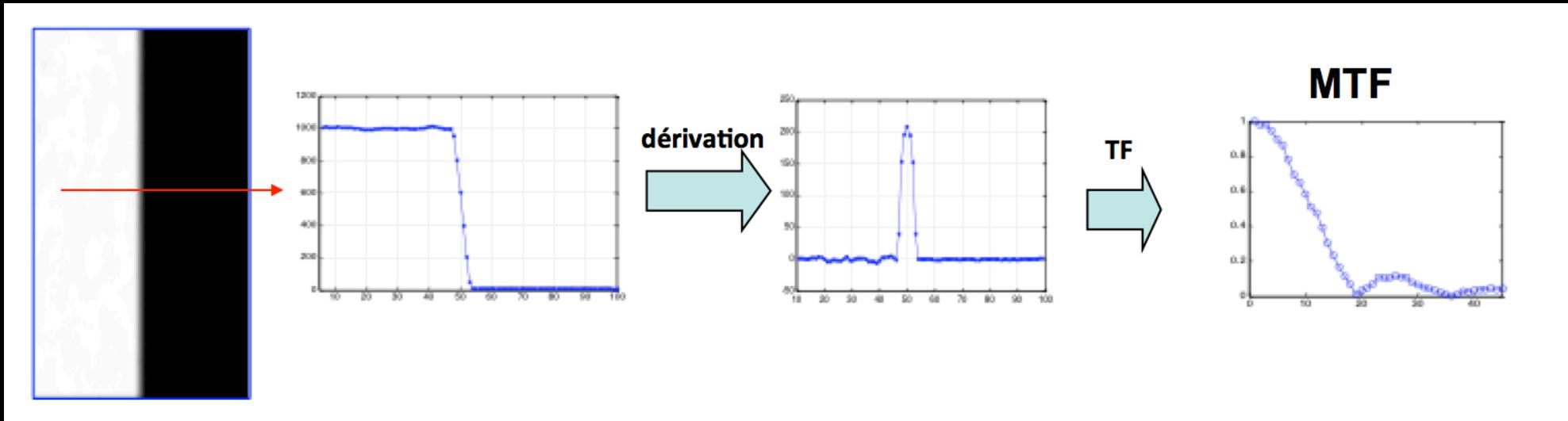


Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

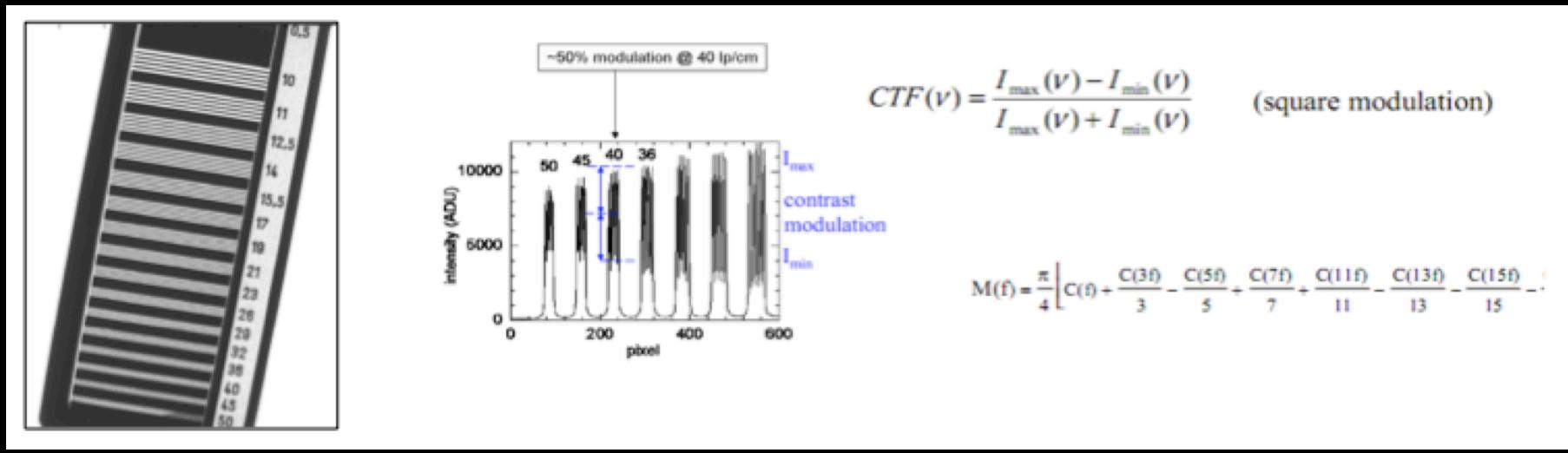
MTF

Méthodes de Mesure

Image d'un bord



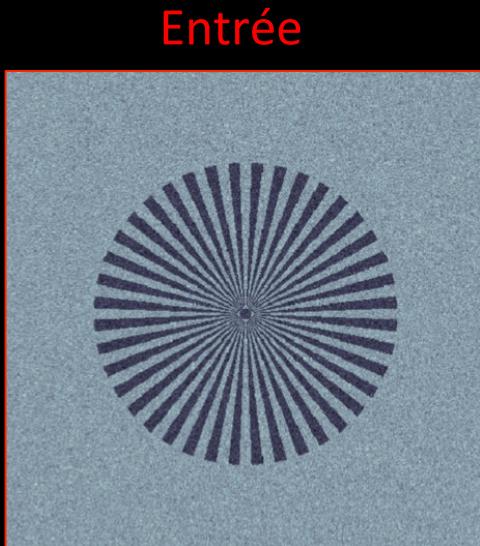
Mire de résolution



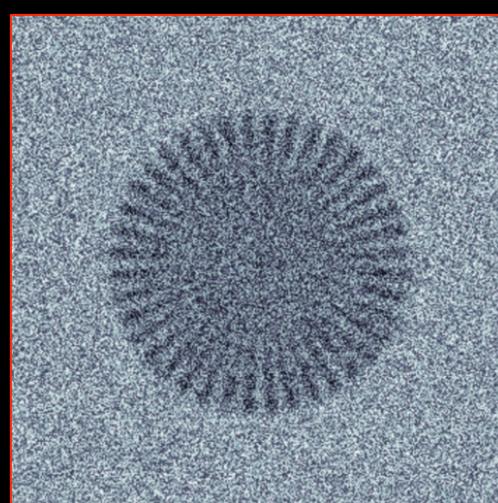
Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

DQE

L'efficacité de détection quantique décrit le transfert du signal/bruit en entrée (Poisson) à travers le système d'imagerie



Système
d'imagerie
réel

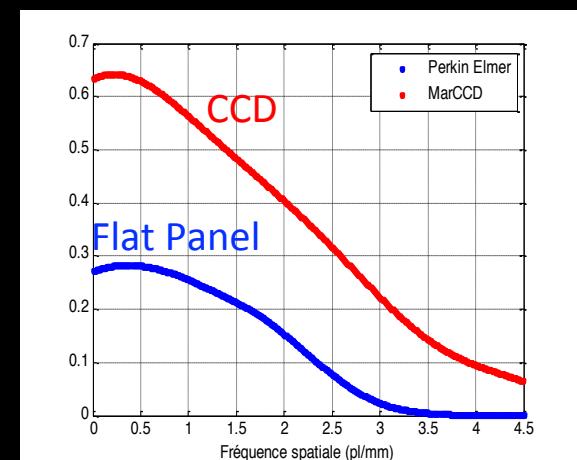


(S/B) = 20 (qq soit freq. spat)



(S/B) = 12 (basse freq. spat.)

(S/B) = 4 (haute freq. spat)



$$DQE = \frac{\left(\frac{S}{B}\right)_{sortie}^2}{\left(\frac{S}{B}\right)_{entrée}^2} = S.g. \frac{MTF(v)^2}{NPS(v)}$$

Même qualité d'image
si

Multiplier par 2 la dose sur le Flat Panel

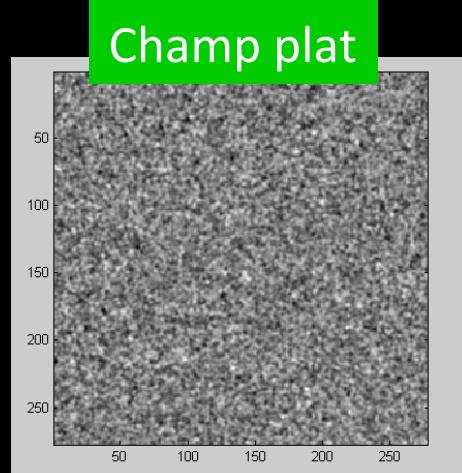
Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

DQE

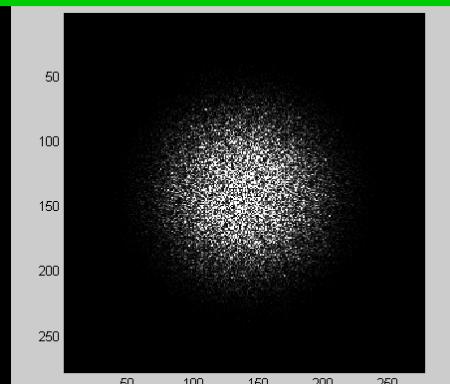
Méthodes de Mesure

$$DQE = S.g. \frac{MTF(\nu)^2}{NPS(\nu)}$$

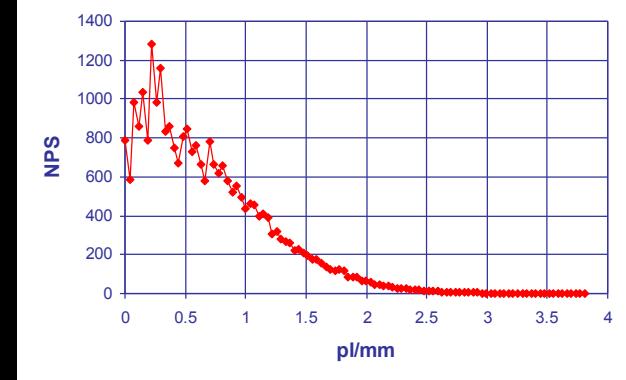
Mesure du NPS (Décomposition spectral de la variance)



$$NPS(\nu_x, \nu_y) = \frac{|TF2D(I(x, y) - \bar{I}(x, y))|^2}{N_x N_y}$$



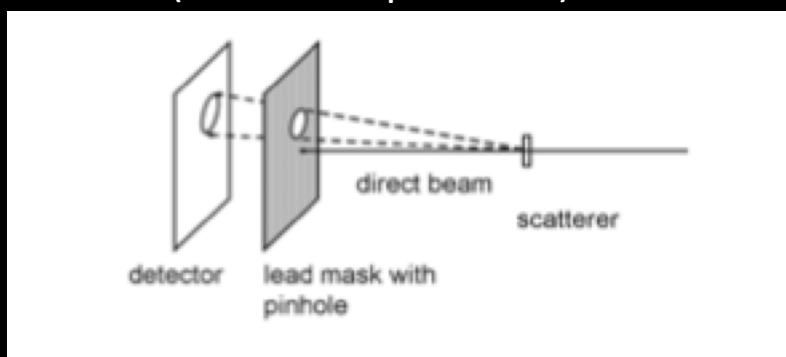
$$NPS(\nu) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M(\nu \cos \theta, \nu \sin \theta) d\theta$$



Intégration azimutale

Mesure du Gain

Mesure comparative entre une mesure avec le détecteur 2D et un compteur de photon absolu (détecteur ponctuel)

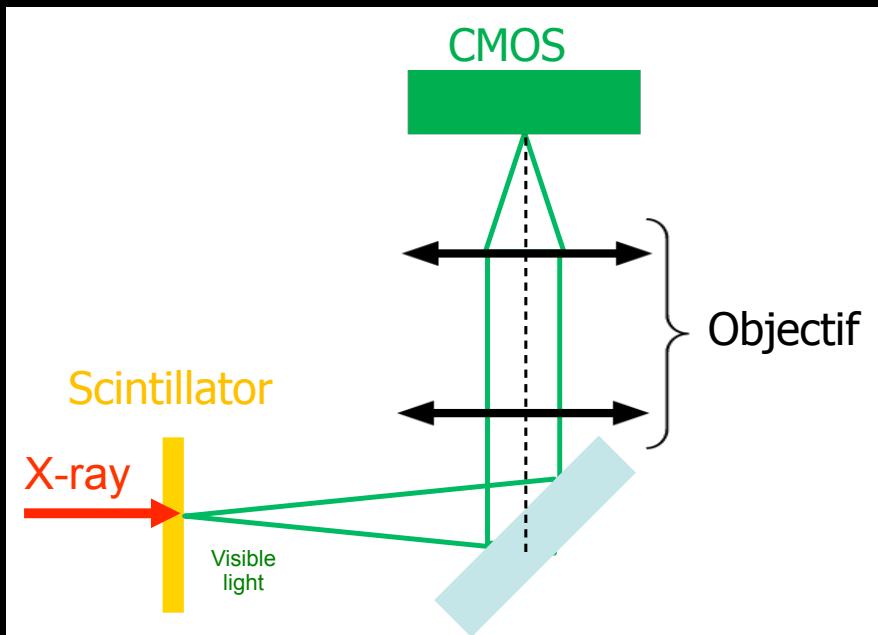


$$G = \frac{\sum_i \sum_j I_x(i, j) - I_{dark}(i, j)}{(\iint S_i(x, y) dx dy) \Delta T} = \frac{\text{integrated pixel values in dark subtracted image}}{\text{counts through pinhole measured with a counter}}$$

Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Caractérisation caméra pour la tomographie X

Développement d'un détecteur 2D pour des TP d'imagerie X (Coll. K. Desjardins, M. Bordessoule)



- Scintillator : $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)
- Optics lens: magnification of 3
- CMOS Camera from PCO: 2560 x 2160 pixels, 7.5 μm pixel size, ADC 16 bits

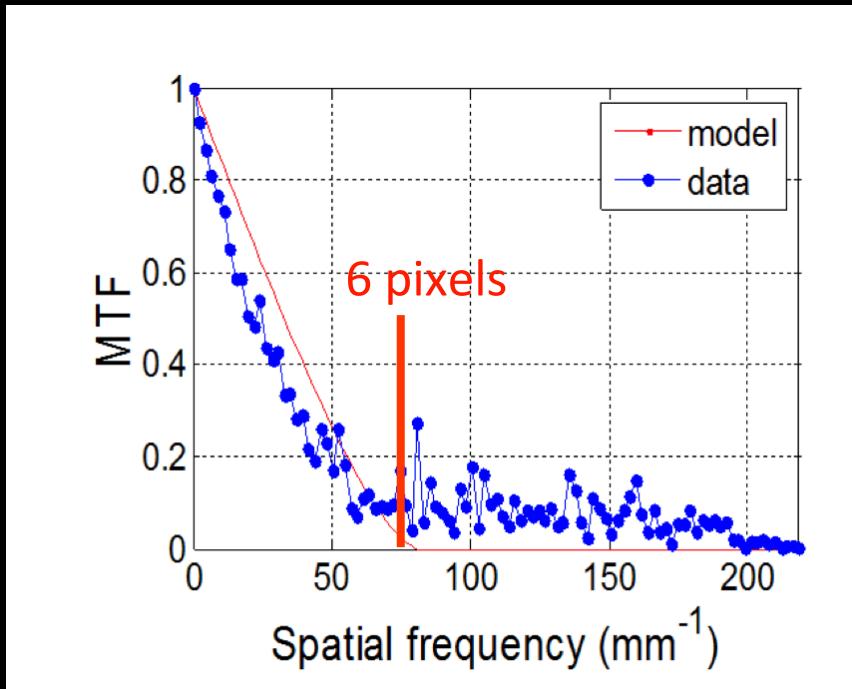


- Field of view : $5.5 \times 4.6 \text{ mm}^2$
- Effective pixel size: 2.16 μm
- Frame rate: 100 Hz

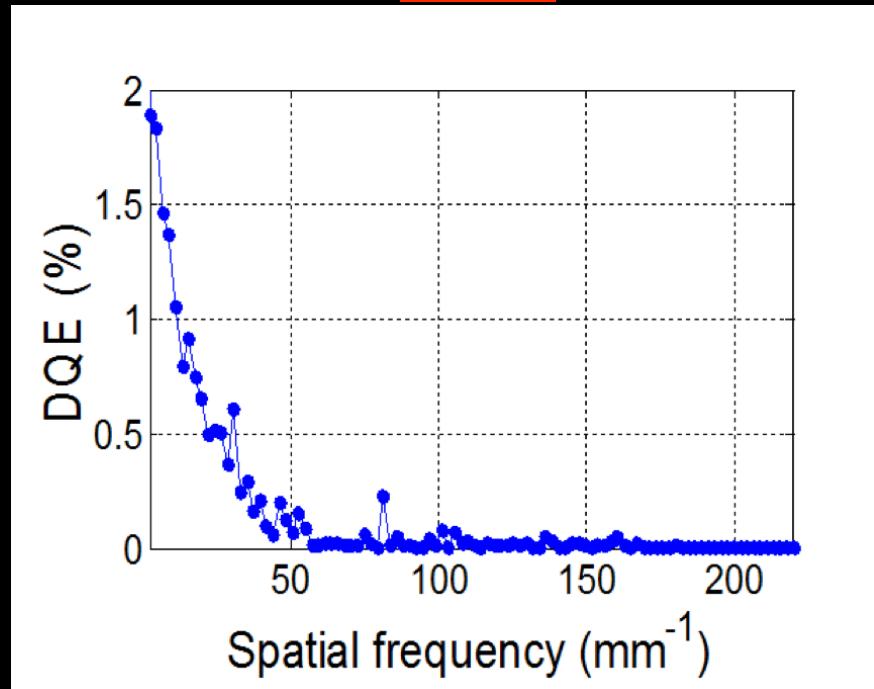
Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Caractérisation caméra pour la tomographie X

MTF



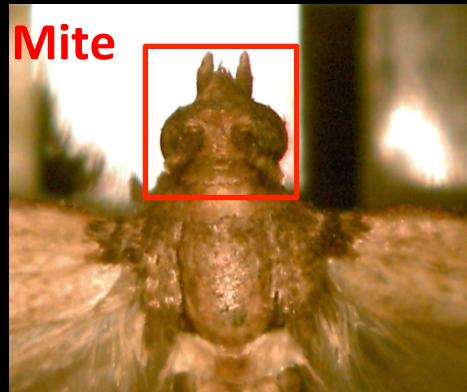
DQE



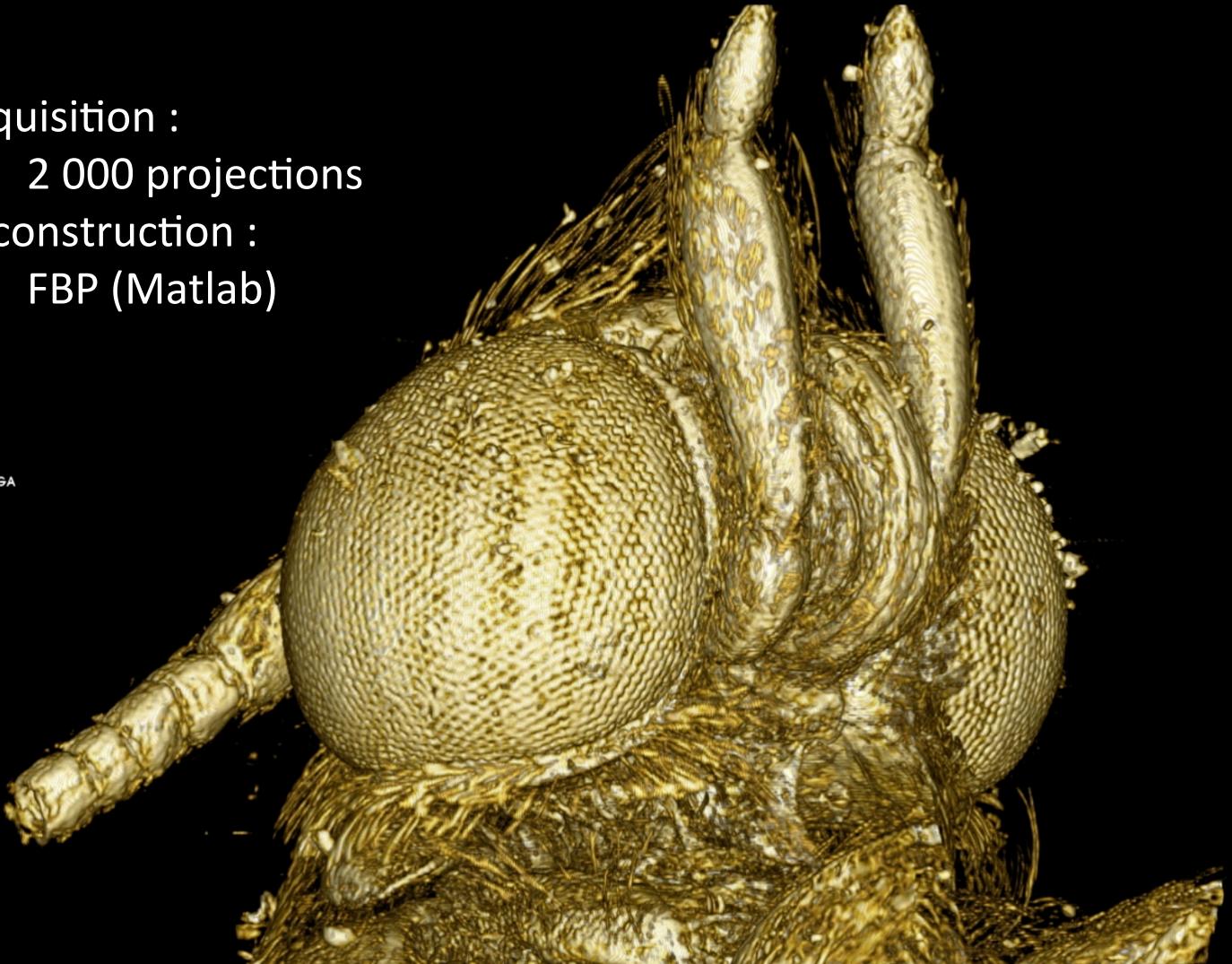
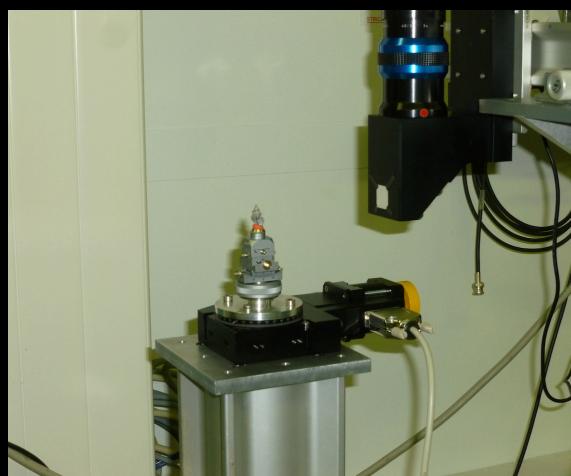
- MTF montre un fort étalement du signal par rapport à la taille pixel effective
- Très faible DQE → Dose inutile importante sur l'échantillon

Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Caractérisation caméra pour la tomographie X



- Acquisition :
 - 2 000 projections
- Reconstruction :
 - FBP (Matlab)

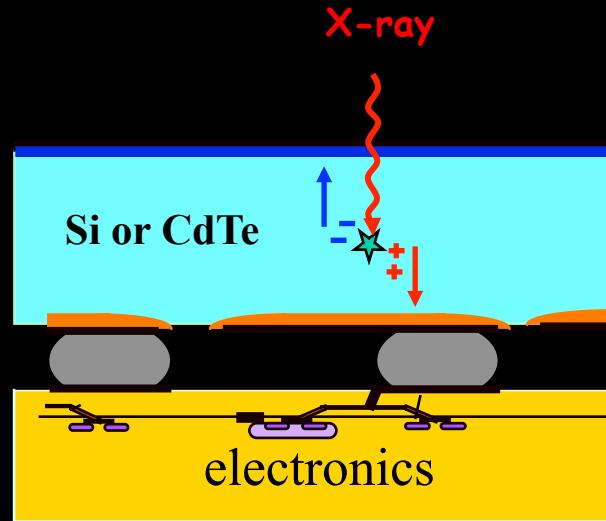


Desjardins, K., Bordessoule, M., Petrache, C., Menneglier, C., Dallé, D., Mercere, P., & Medjoubi, K. (2014). *JINST*, 9(06)

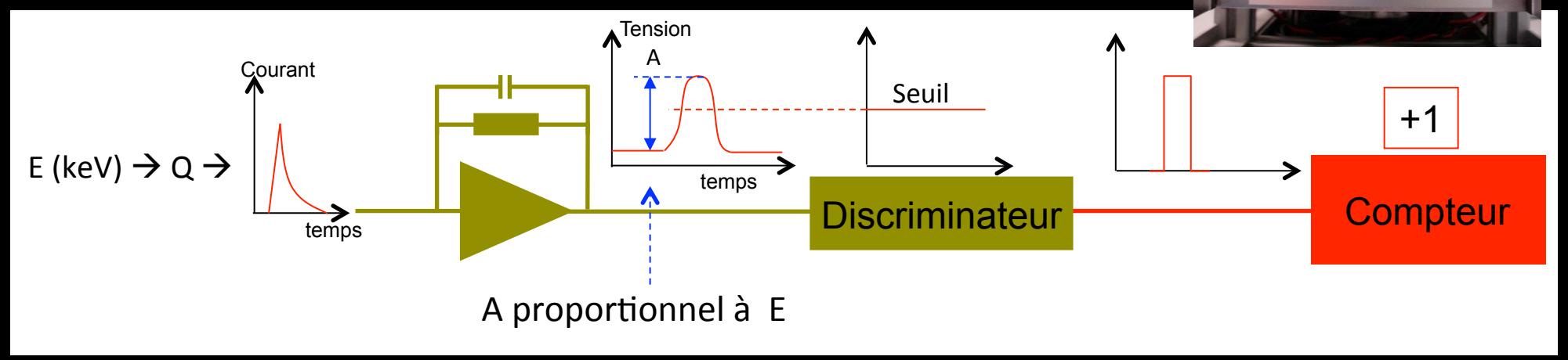
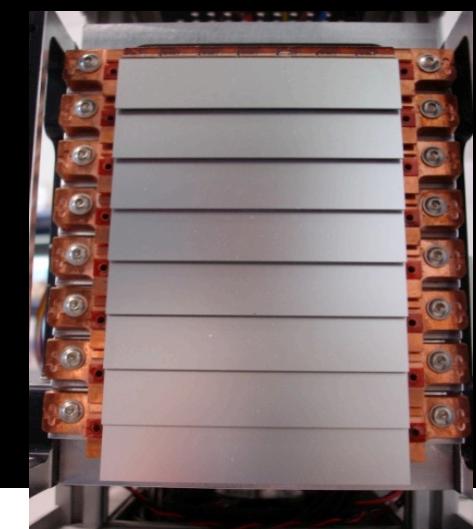
Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Caractérisation du XPAD Si et CdTe

Principe de fonctionnement et caractéristiques du XPAD



- ✓ Capteur : Si (500µm) ou CdTe (700µm)
- ✓ Taille pixel: $130 \times 130 \mu\text{m}^2$
- ✓ Seuil bas ajustable
- ✓ 80×120 pixels / chip
- ✓ $1 \times 1.5 \text{ cm}^2$
- ✓ $\text{qq } 10^5 \text{ photons/s/pixel}$
- ✓ compteur 12 bits rotatif → dynamique infinie
- ✓ Temps de lecture / image 2 ms



Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Caractérisation du XPAD Si et CdTe

Evaluer l'effet des seuils K dans le CdTe sur les performances (K_{Cd} = 26.7 keV, K_{Te} = 31.8 keV)

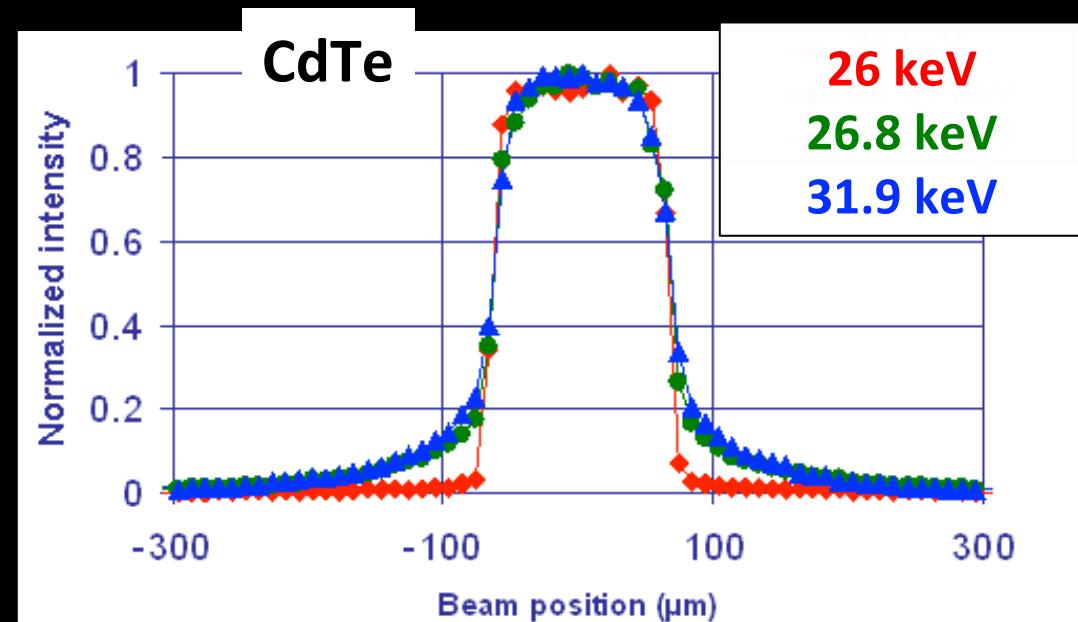
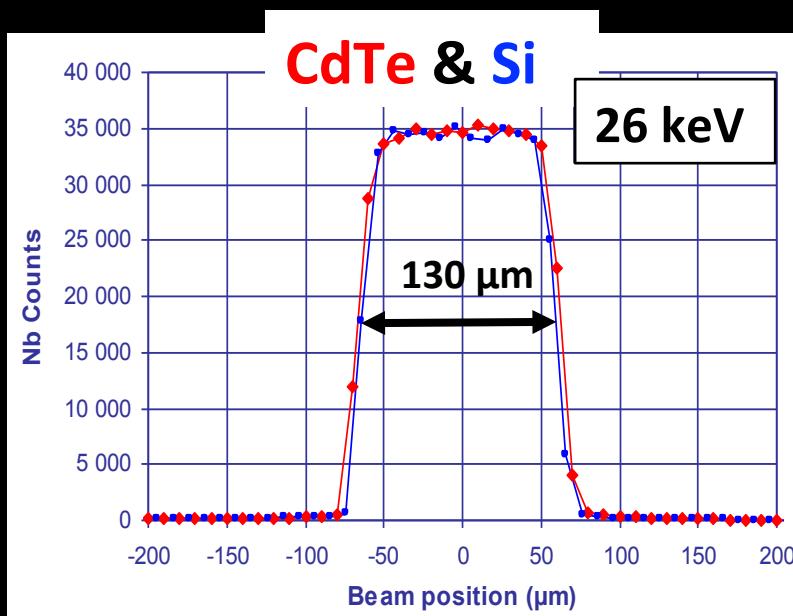


Mesure

Modélisation

Performances spatiales

Mesure de la réponse d'un seul pixel en fonction de la position du faisceau direct (10µm)



Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Caractérisation du XPAD Si et CdTe

Evaluer l'effet des seuils K dans le CdTe sur les performances ($K_{Cd} = 26.7 \text{ keV}$, $K_{Te} = 31.8 \text{ keV}$)

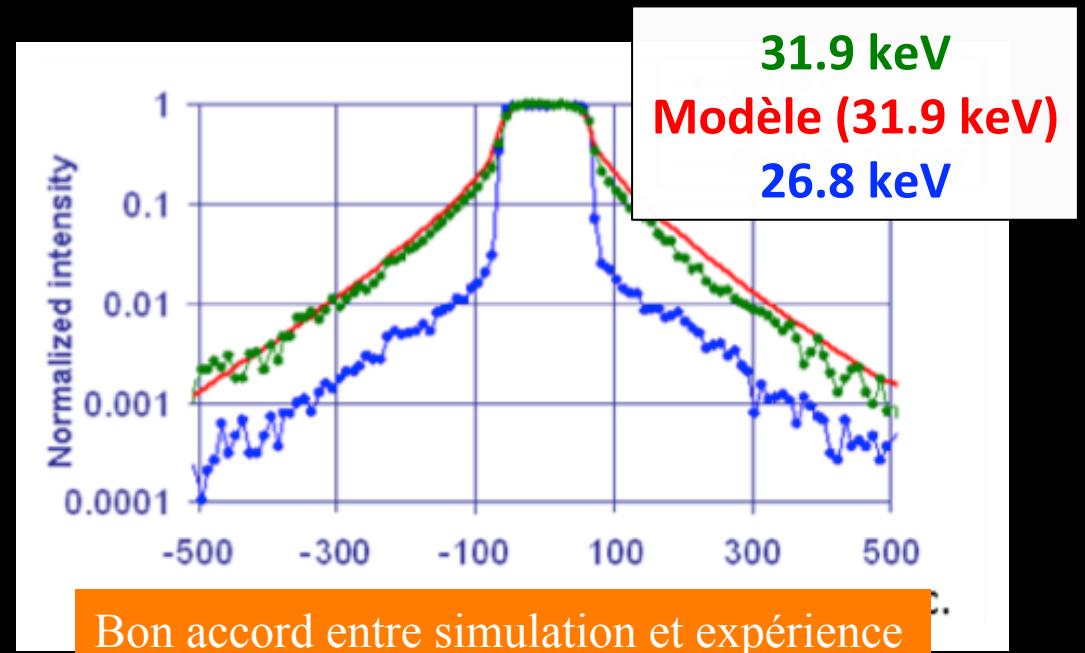
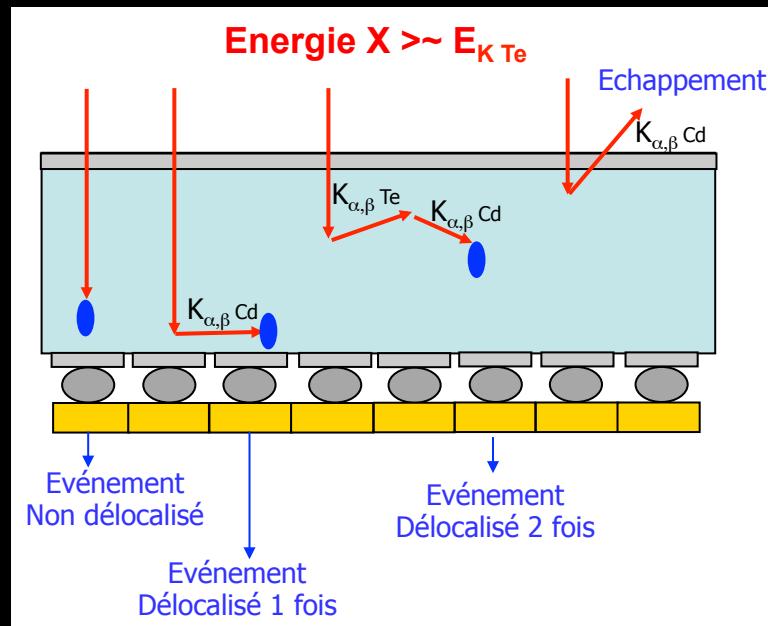


Mesure

Modélisation

Performances spatiales

Modélisation de l'effet de la fluorescence X dans le CdTe sur la résolution spatiale



Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Caractérisation du XPAD Si et CdTe

Evaluer l'effet des seuils K dans le CdTe sur les performances ($K_{Cd} = 26.7 \text{ keV}$, $K_{Te} = 31.8 \text{ keV}$)

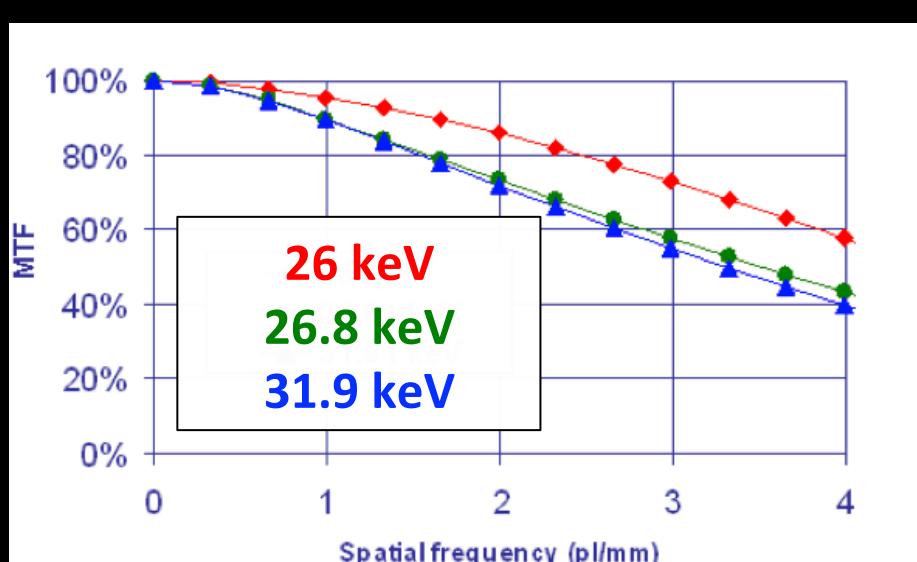


Mesure

Modélisation

Performances spatiales

MTF



MTF acceptable au seuil du Cd et Te

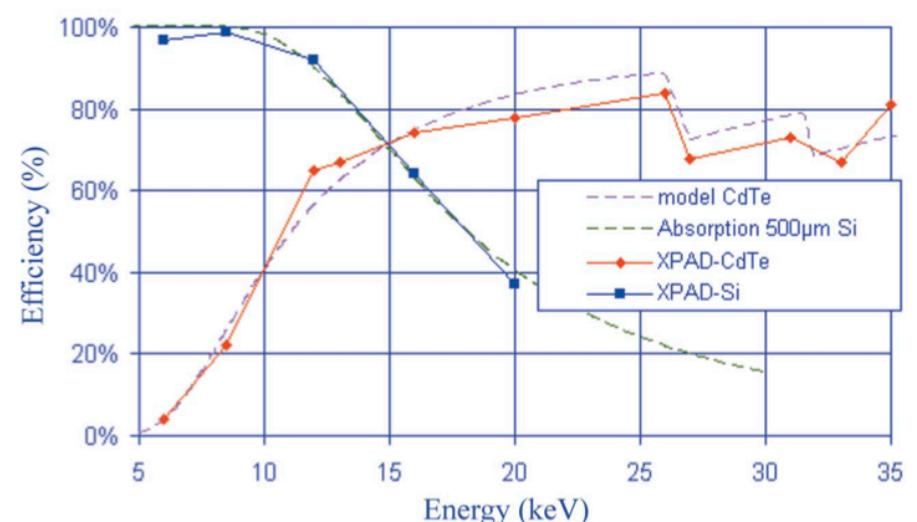
Medjoubi, K., Bucaille, T., Hustache, S., Bérar, J. F., Boudet, N., Clemens, J. C., ... & Dinkespiler, B. (2010). Journal of synchrotron radiation, 17(4), 486-495.

Performances de détection de 6 à 35 keV

XPAD →

$$DQE(\nu) = g \cdot \frac{S}{NPS(\nu)} MTF(\nu)^2 = \varepsilon \cdot MTF(\nu)^2$$

DQE à fréquence spatiale nulle



- DQE XPAD3 – CdTe > DQE XPAD3 – Si qd E > 15 keV
- Faible DQE XPAD3 – CdTe qd E < 15 keV ← zone morte (10μm)

Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Etude de la diffusion X dans le XPAD-Si et CdTe

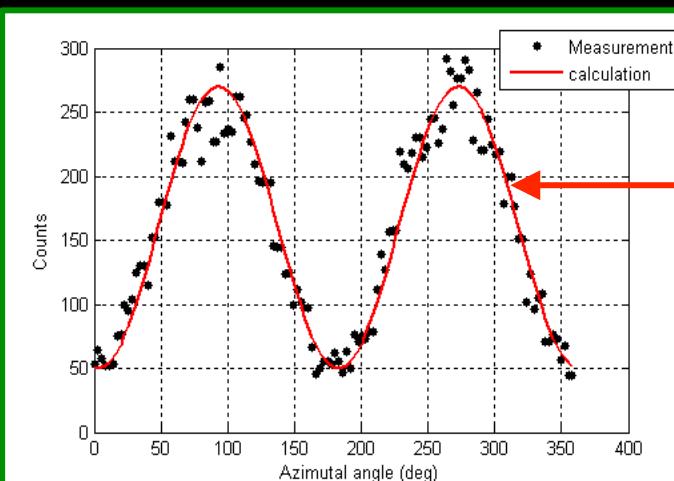
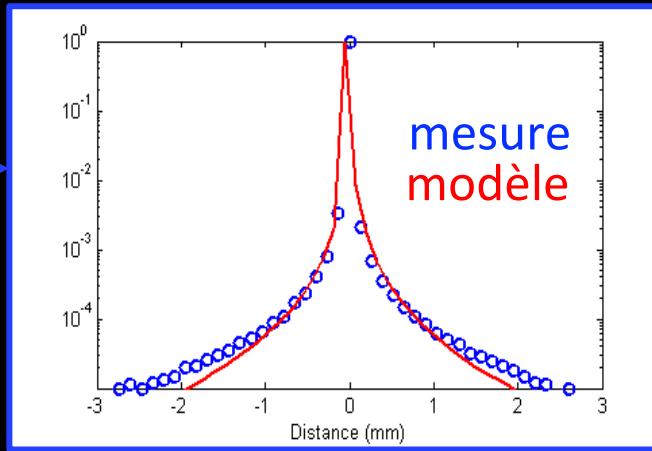
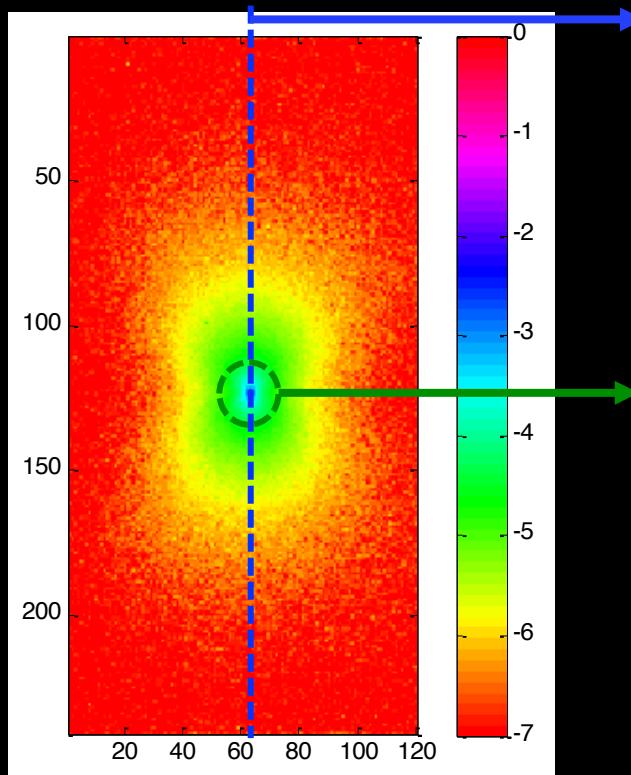
Elargissement du signal au pied des pics de Bragg enregistré avec le XPAD-Si @ 25 keV
(Diffusion diffuse sur CRISTAL)



Mesure

Modélisation

Faisceau direct ($10 \times 10 \mu\text{m}$) 25 keV
XPAD-Si



$$\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega_{coherent}} = re^2 P(\theta, \varphi) f_0^2 \left(\frac{\sin \theta}{\lambda}, Z \right)$$
$$\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega_{incoherent}} = re^2 P(\theta, \varphi) S \left(\frac{\sin \theta}{\lambda}, Z \right)$$

avec $P(\theta, \phi) = 1 - \sin(2\theta)^2 \sin(\phi)^2$

Plan transverse

$$P(\theta, \phi) = 1 - \sin(\phi)^2$$

Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

Etude de la diffusion X dans le XPAD-Si et CdTe

Elargissement du signal au pied des pics de Bragg enregistré avec le XPAD-Si @ 25 keV
(Diffusion diffuse sur CRISTAL)

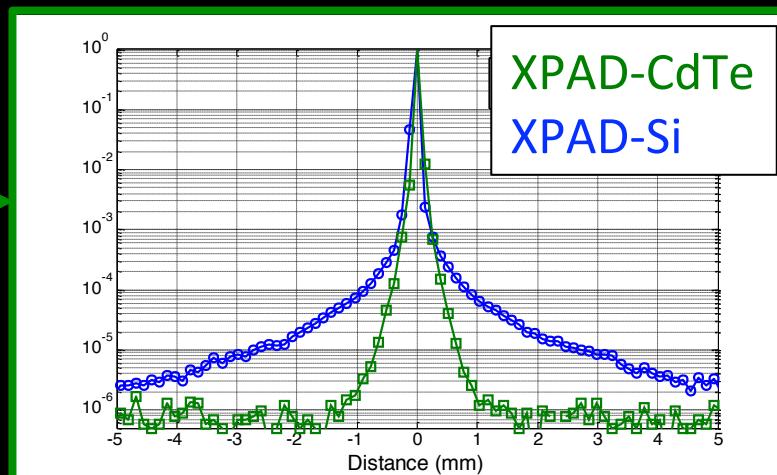
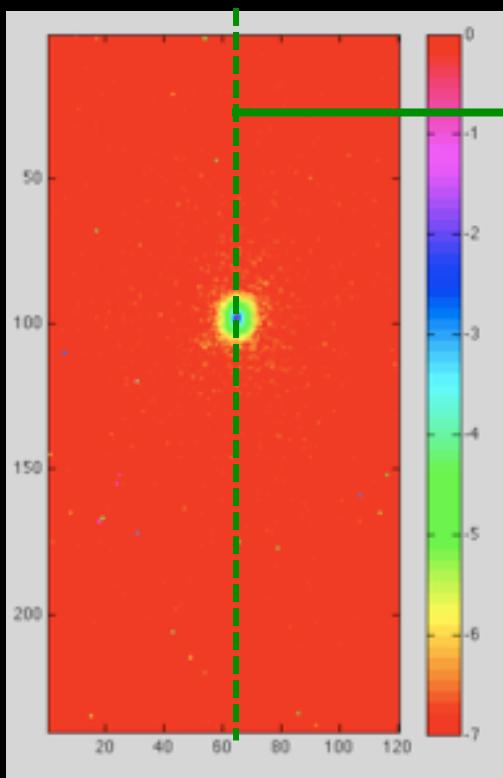


Mesure

Modélisation

Faisceau direct ($10 \times 10 \mu\text{m}$) 25 keV

XPAD-CdTe



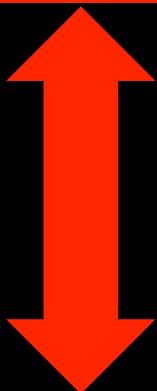
Largeur à 0.001%

- Si-XPAD $\sim 5 \text{ mm}$
- CdTe-XPAD $\sim 1 \text{ mm}$

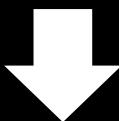
Importance du CdTe pour les expériences de type diffusion diffuse

Evaluation des performances d'un système d'imagerie X

L'évaluation des performances d'imagerie X d'un détecteur 2D est indispensable

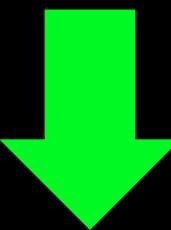
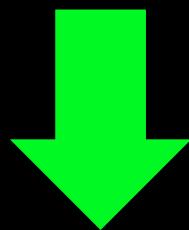


Etablir le rendement d'utilisation des photons



Optimiser les choix et/ou paramètres d'un détecteur (commercial / R&D) pour une exp. donnée

**Compréhension des phénomènes physiques dans les détecteurs
(modélisation et mesures)**



Innover dans de nouvelles méthodologies

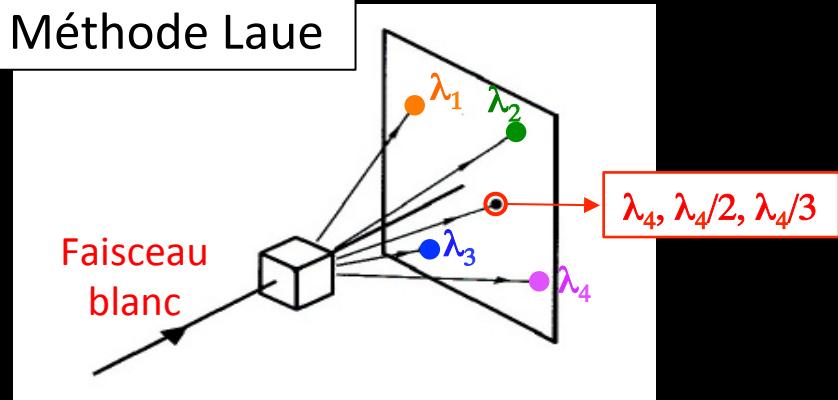
S'orienter vers de nouveaux prog. R&D afin d'améliorer l'existant

III. Développement méthodologique et applications en imagerie X au synchrotron Soleil

Développement méthodologique et applications

Imagerie X couleurs appliquée à la diffraction Laue Résolue en énergie avec le XPAD

Méthode Laue



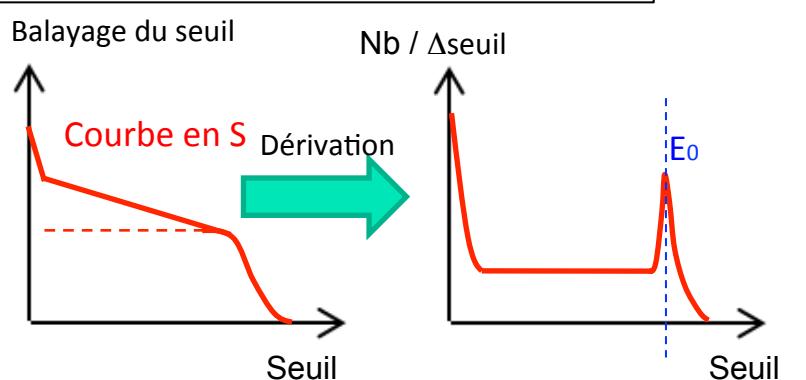
Apport de l'imagerie couleur

- Faciliter l'indexation du cristal (association d'un pic à un plan cristallin)
- Dé-convoluer les multiplets (Cartes de densité électronique plus précises)

XPAD – CdTe

Mesurer l'intensité et l'énergie de la diffraction (Haute Energie)

Reconstruction du spectre par pixel

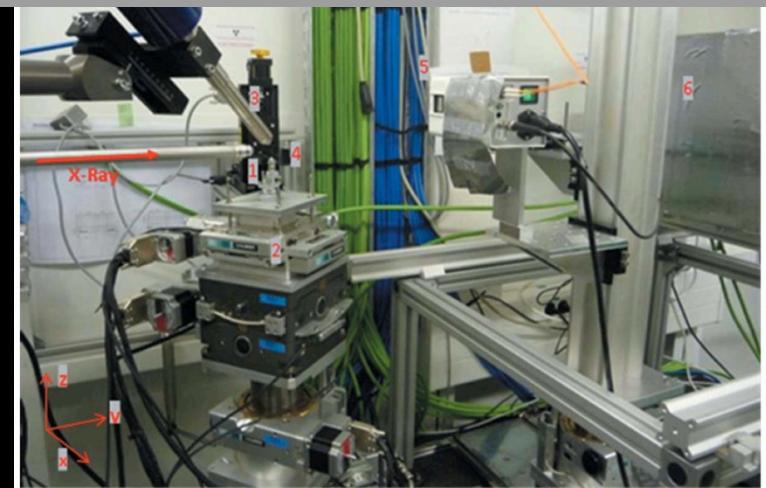


Calibration en énergie de chaque pixel

- Réduction de dispersion des seuils inter pixels
- Modéliser la réponse d'un pixel → fit courbe en S

Précision de la mesure de l'énergie incidente $\sim \sigma = 140 \text{ eV}$

Mise en application sur Metrologie

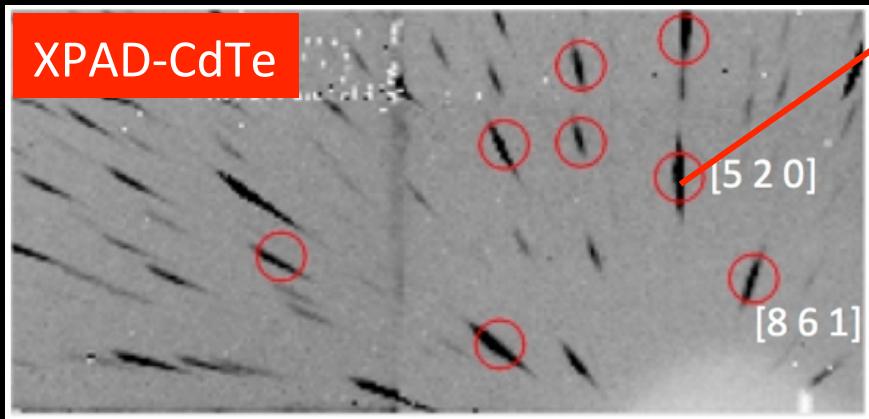
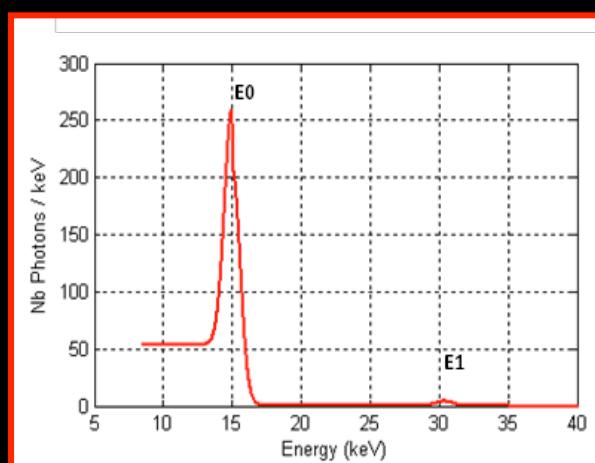
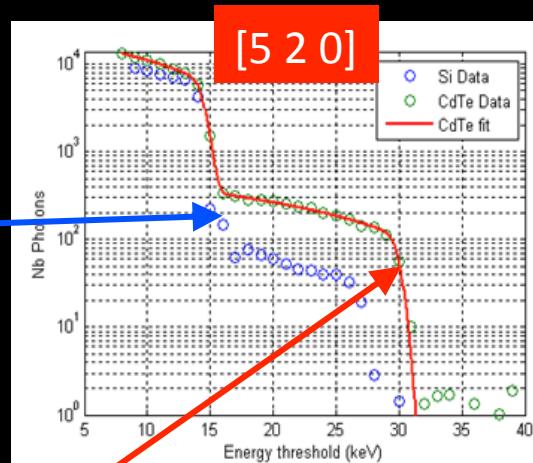
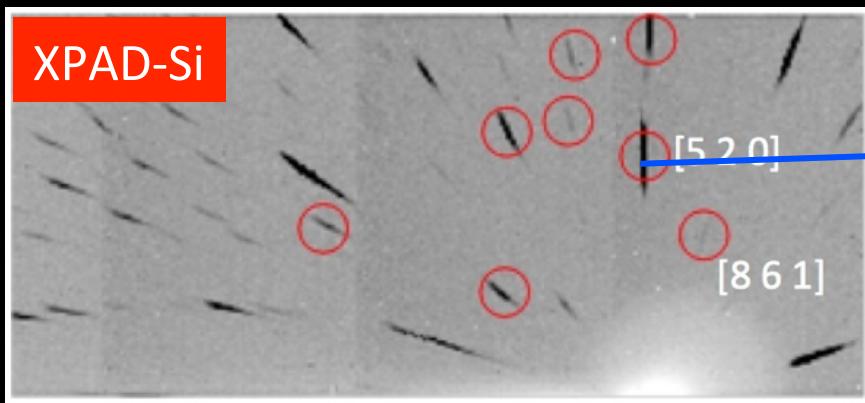


Expérience de diffraction Laue d'un cristal de Lyzozyme avec XPAD-CdTe et Si

Les détecteurs pixels à comptage de photon

Imagerie couleur appliquée à la diffraction Laue Résolue en énergie (collab. PX1 & Psiché / D2AM)

Acquisition à différents seuils de 7 à 40 keV



Energies reconstruites en accord avec celles prédictes

Perspectives possibles

- Collecte sans rotation du cristal (ex. : cristaux sur plaques de cristallisation, plaques micro-fluidiques, ou dans enclumes diamants)
- Rejection du Compton (enclumes diamant)
- ...

Expérience Laue + diffusion diffuse

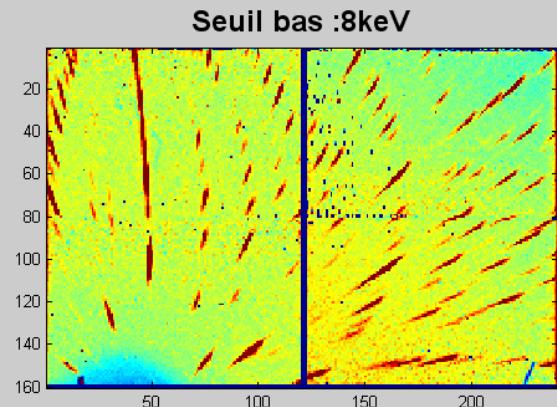
Medjoubi, K., Thompson, A., Bérar, J. F., Clemens, J. C., Delpierre, P., Da Silva, P., ... & Samama, J.P. (2012). Journal of synchrotron radiation, 19(3), 323-331.

XPAD – CdTe (7 x 12 cm²)
(CPPM, Ins. Néel, SOLEIL)

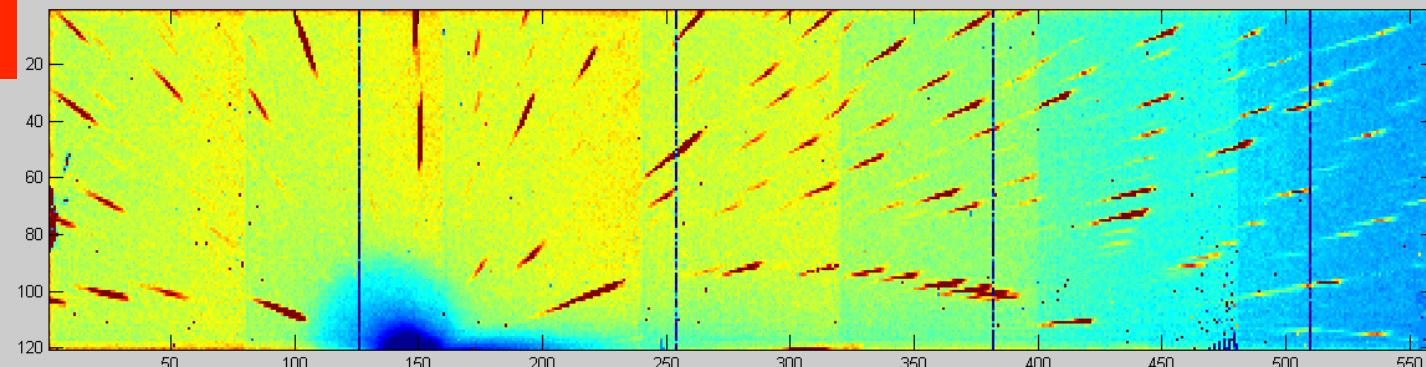
Les détecteurs pixels à comptage de photon

Imagerie couleur appliquée à la diffraction Laue Résolue en énergie (collab. PX1 & Psiché / D2AM)

XPAD-CdTe

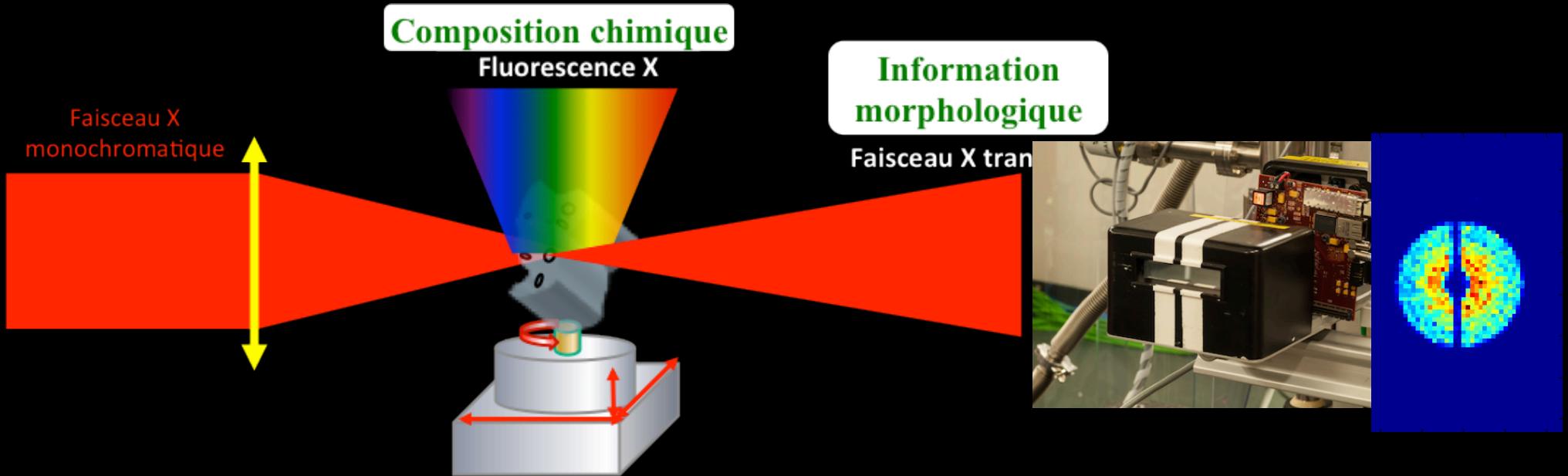


XPAD-Si



Développement méthodologique et applications

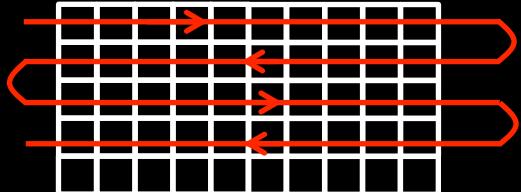
Imagerie X multimodal rapide avec le XPAD (intégration dans l'architecture Flyscan)



Acquisition Flyscan

Balayage continu en horizontal

- Dwell time min (durée passée sur un pixel carto) : 2ms
- Scan unidirectionnel ou scan **bidirectionnel**



Traitemet Data On-line

Image XPAD

DPC
Transmission
Dark field

Codeurs

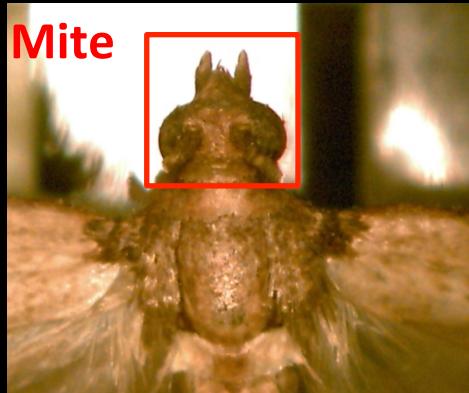
Spectre Fluo X

ROI

Images
corrigées avec
les positions

Développement méthodologique et applications

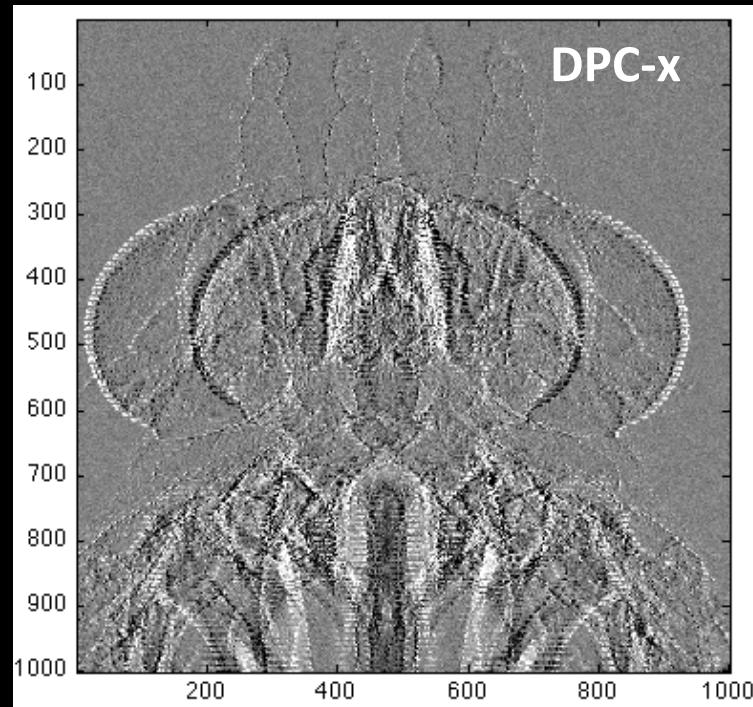
Imagerie X multimodal rapide avec le XPAD (intégration dans l'architecture Flyscan)



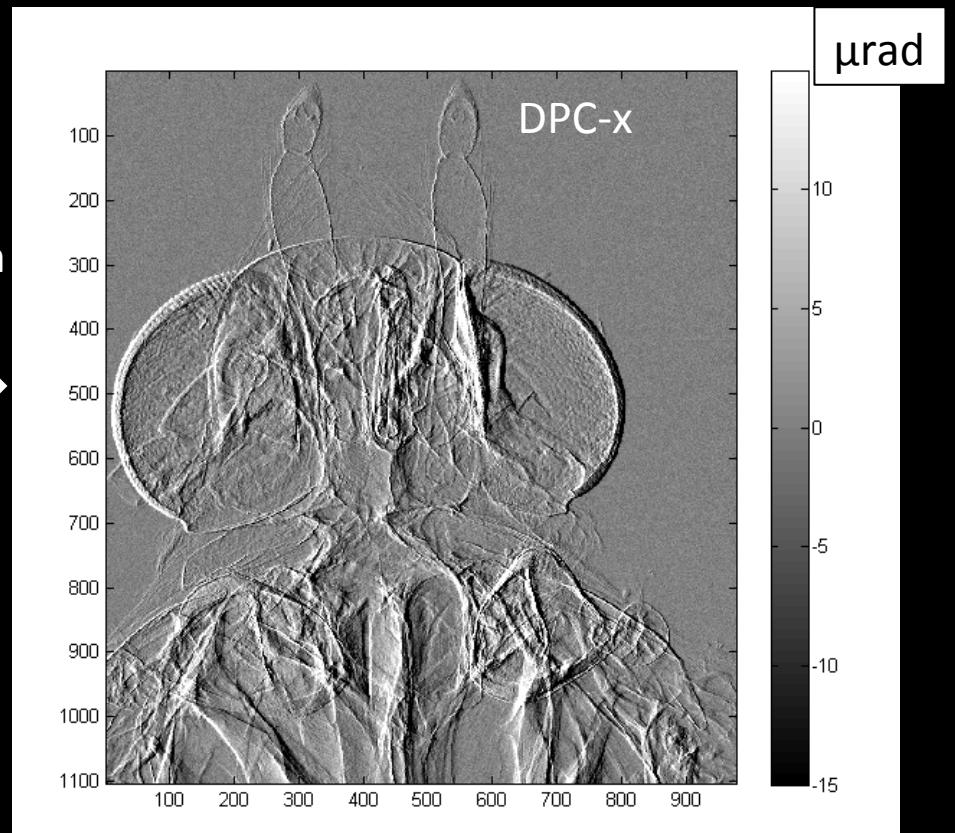
Paramètres du scan

- Taille carto: 1000 x 1000 pixels
- Taille pixel $1.6\mu\text{m}$ (H) x $2\mu\text{m}$ (V)
- Dwell time : 12 ms
- Scan bidirectionnel

1 million images XPAD
1 million valeurs MI
2 millions positions moteur
Fichier Nexus final: 140 Go

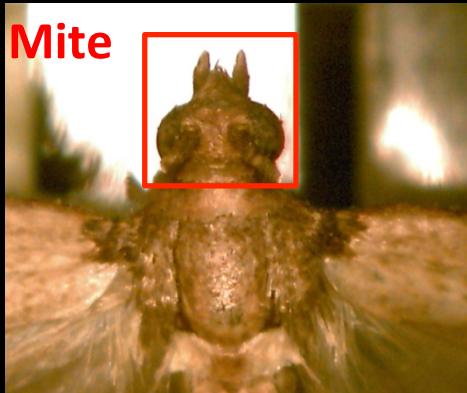


Correction
Position



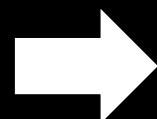
Développement méthodologique et applications

Imagerie X multimodal rapide avec le XPAD (intégration dans l'architecture Flyscan)

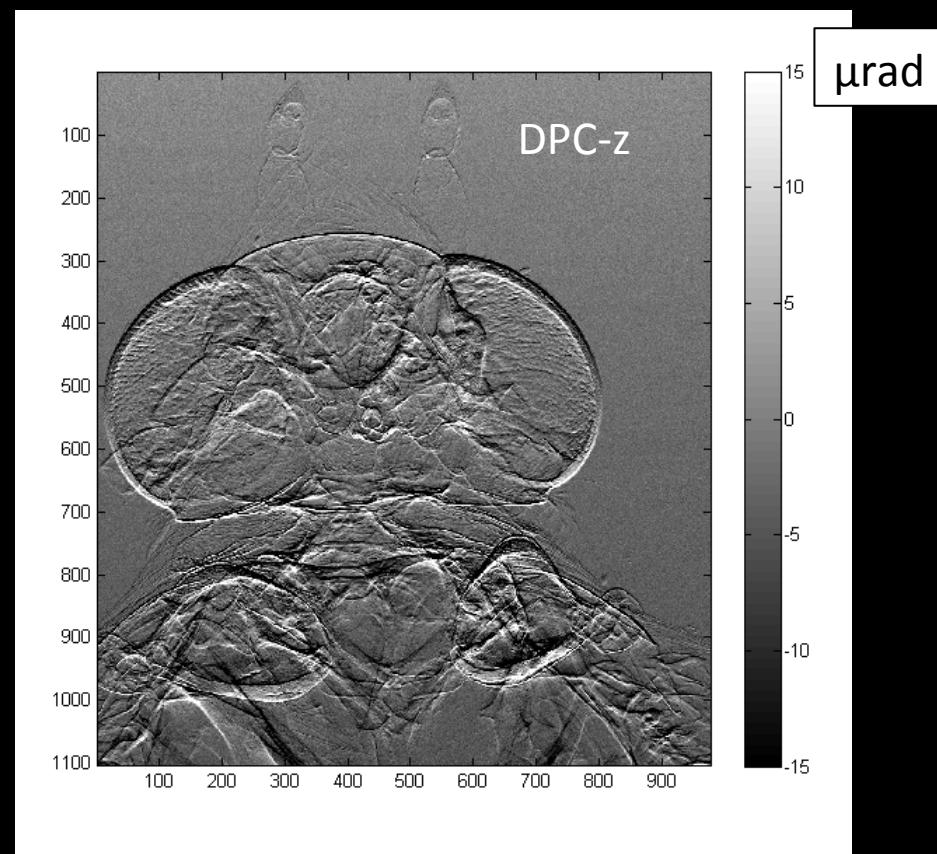
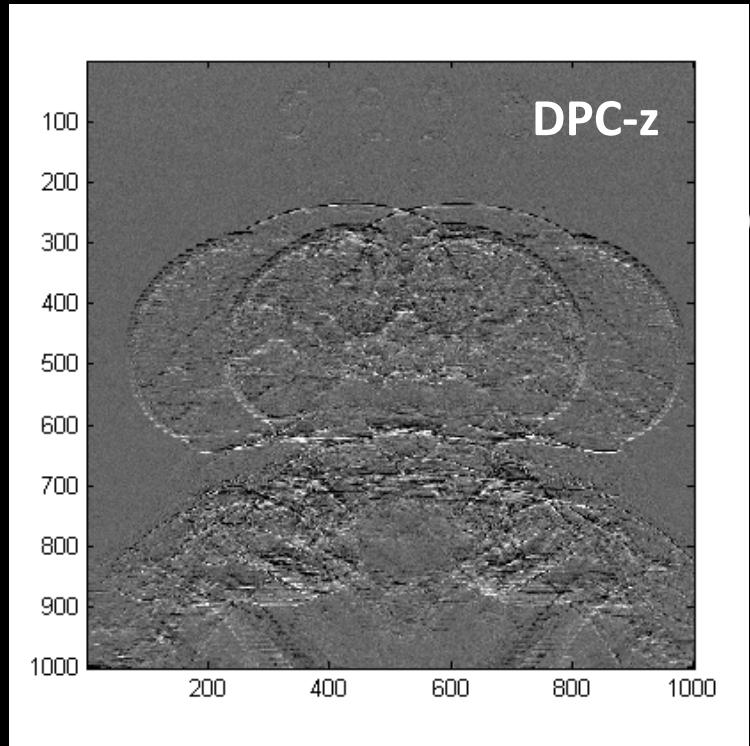


Paramètres du scan

- Taille carto: 1000 x 1000 pixels
- Taille pixel $1.6\mu\text{m}$ (H) x $2\mu\text{m}$ (V)
- Dwell time : 12 ms
- Scan bidirectionnel



1 million images XPAD
1 million valeurs MI
2 millions positions moteur
↓
Fichier Nexus final: 140 Go



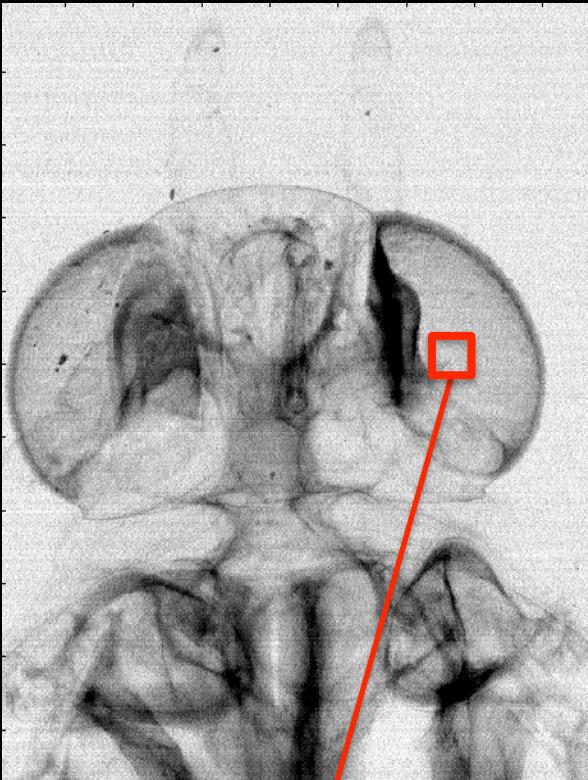
Développement méthodologique et applications

Imagerie X multimodal rapide avec le XPAD (intégration dans l'architecture Flyscan)

Phase image



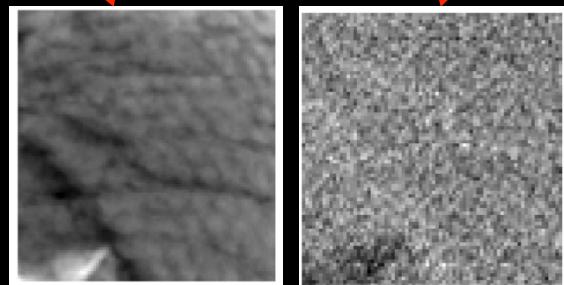
Absorption image



Dark field image



Phase retrieval : Fourier
integration technique
*De C. Kottler and al. Opt.
Express 15, 1175-1181
(2007)*



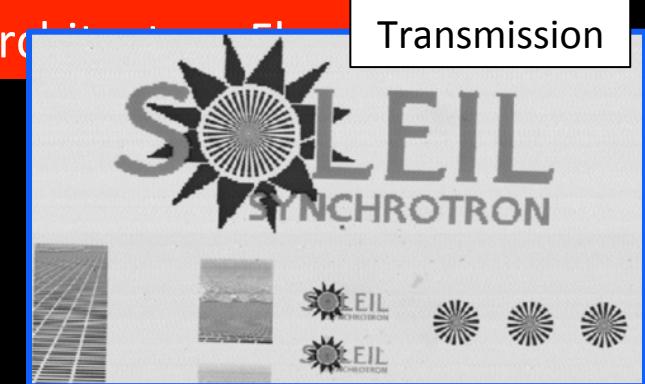
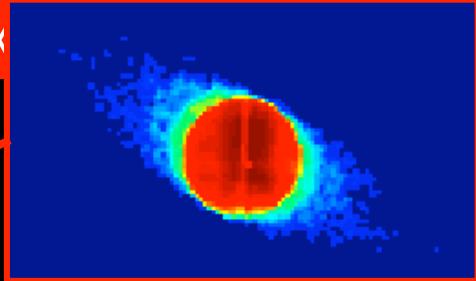
Développement méthodologique et applications

Imagerie X multimodal rapide avec le \times

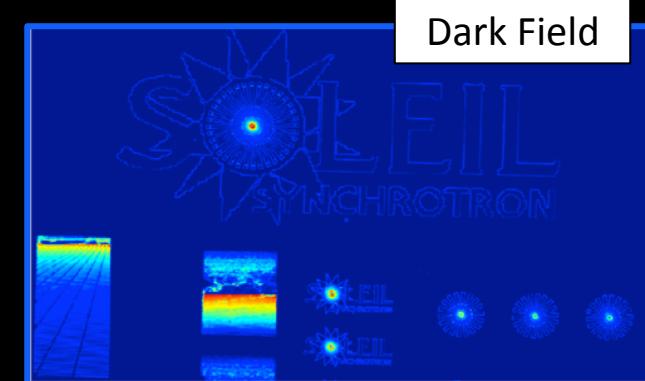
SOLEIL (Nickel et Or)



- Taille carto : 500 x 1000
- Taille Pixel: 400 nm x 400 nm
- Dwell time : 4 ms (flux att.)
- Temps acq. tot.: 45 min
- Fichier : 100 Go



Nickel Or



Transmission

Phase

Dark Field

Développement méthodologique et applications

Application du Flyscan à la recherche en Paleo-Geo-Biologie

Coll A. Somogyi (SOLEIL), P. Philippot, IPGP

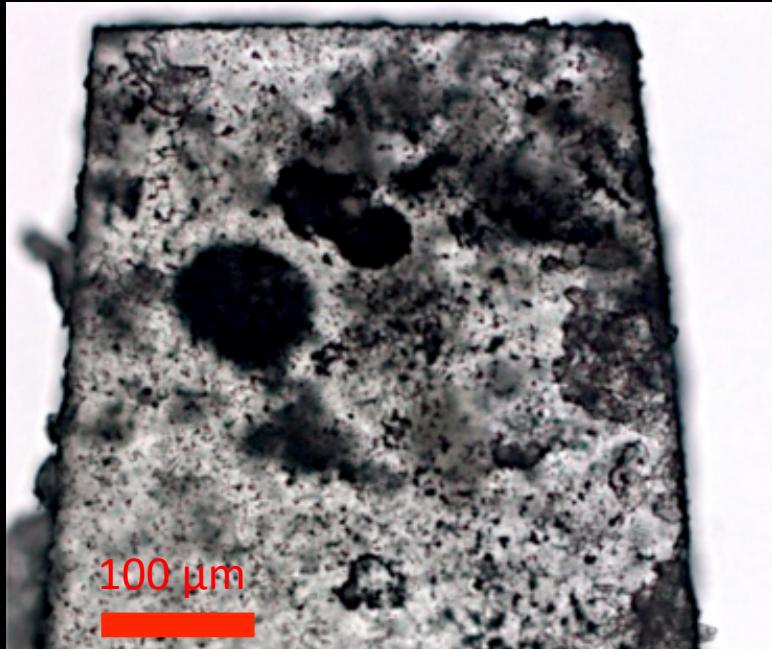
Recherche de traces de vie fossilisées dans les roches très anciennes type stromatolithe (Archéen, 4.0 à 2.5 Ga)

Biotique ou Abiotique ?



Informations morphologiques et de distribution d'éléments 2D et 3D à différentes résolutions

Microscopie optique



Echantillon roche de 3.4 Ga, 80 μm épaisseur
(Carbonate de calcium, cristaux de pyrite et matière organique)

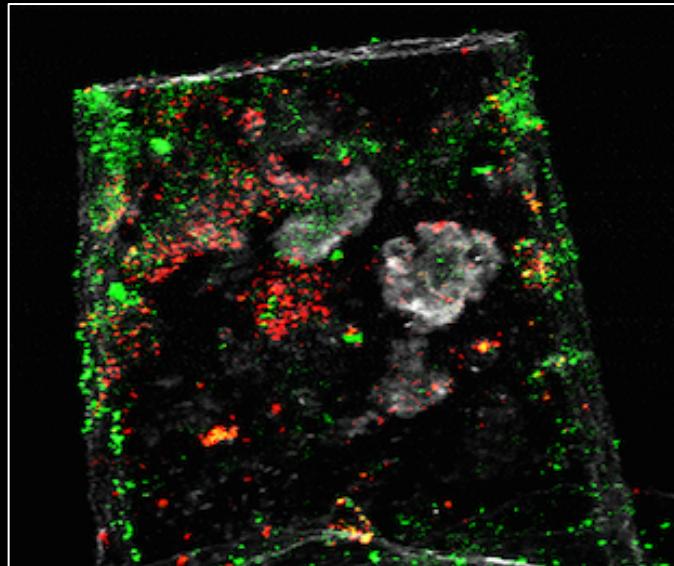
Echantillon représentatif :

Diverse microstructure contenant différents métaux à l'intérieur d'une matrice hétérogène

Développement méthodologique et applications

Application du Flyscan à la recherche en Paleo-Geo-Biologie

Tomographie basse résolution



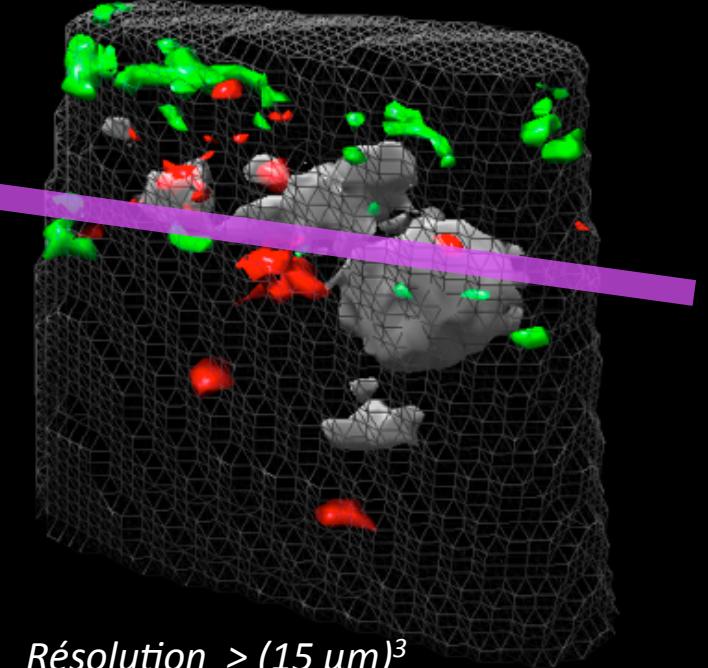
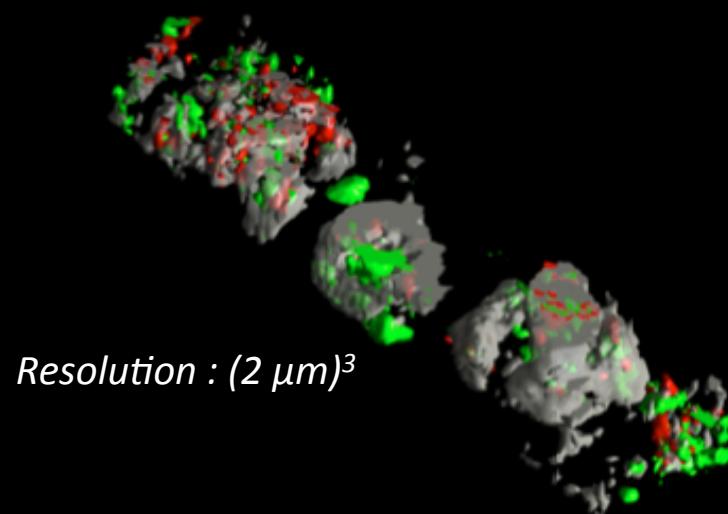
Dark Field

Fe

As

- 10 projections
- Pas angulaire 36°

BP puis
Filtration



Développement méthodologique et applications

Application du Flyscan à la recherche en Paleo-Geo-Biologie

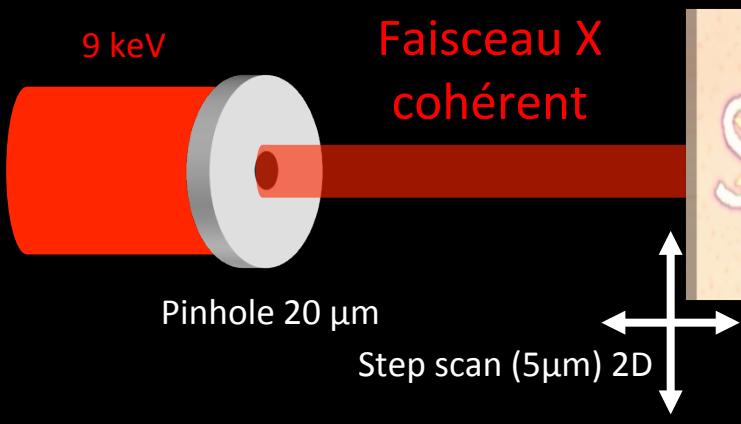
Somogyi, A., Medjoubi, K., Baranton, G., Le Roux, V., Ribbens, M., Polack, F., ... & Samama, J. P. (2015). Optical design and multi-length-scale scanning spectro-microscopy possibilities at the Nanoscopium beamline of Synchrotron Soleil. *Journal of synchrotron radiation*, 22(4), 1118-1129.

Medjoubi, K., Leclercq, N., Langlois, F., Buteau, A., Lé, S., Poirier, S., ... & Somogyi, A. (2013) *Journal of synchrotron radiation*, 20(2), 293-299.

Medjoubi, K., Bonissent, A., Leclercq, N., Langlois, F., Mercère, P., & Somogyi, A. (2013, September). In *SPIE Optical Engineering+ Applications* (pp. 88510P-88510P).

Développement méthodologique et applications

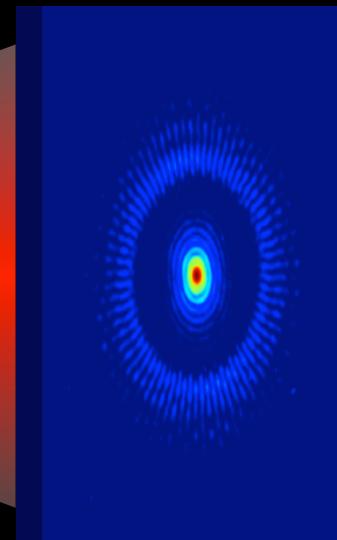
Evaluation de la Ptychographie



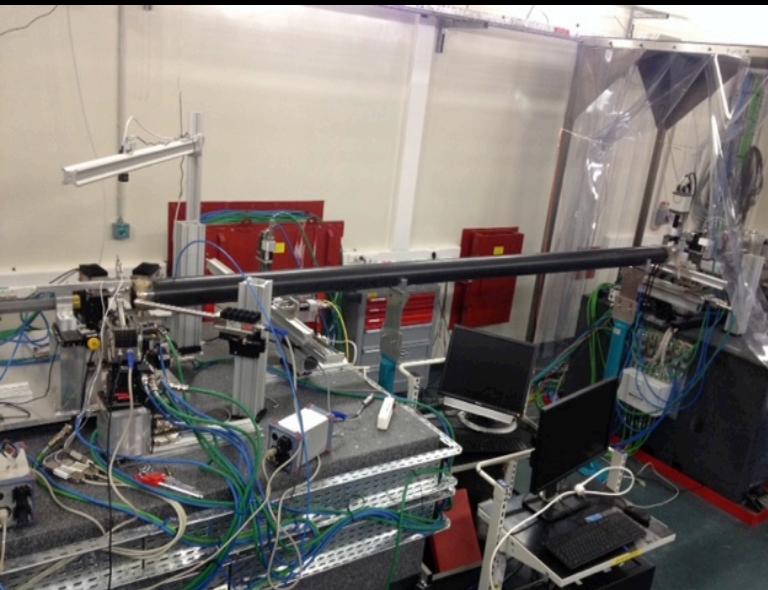
microscopie sans lentilles à rayons X

Evaluation de la méthode sur le démonstrateur CX2

diffraction en champ lointain



|Trans. Fourier (Probe x Objet)|²



Reconstruction de phase et amplitude de l'objet

Méthode numérique itérative (PIE)

$$O_{n+1}(r - r_i) = O_n(r - r_i) + U(r) \times \left(\mathcal{F}^{-1} \left(\sqrt{|I_j(k)|} e^{i\phi_{j,n}(k)} \right) - P(r) O_n(r - r_j) \right)$$

$$U(r) = \beta \frac{|P(r)|}{\max(|P(r)|)} \frac{P^*(r)}{|P(r)|^2 + \alpha}$$

$$\text{Pixel}_{\text{Objet}} = \lambda z / (\text{Pixel}_{\text{detecteur}} \times N_{\text{pixel}})$$

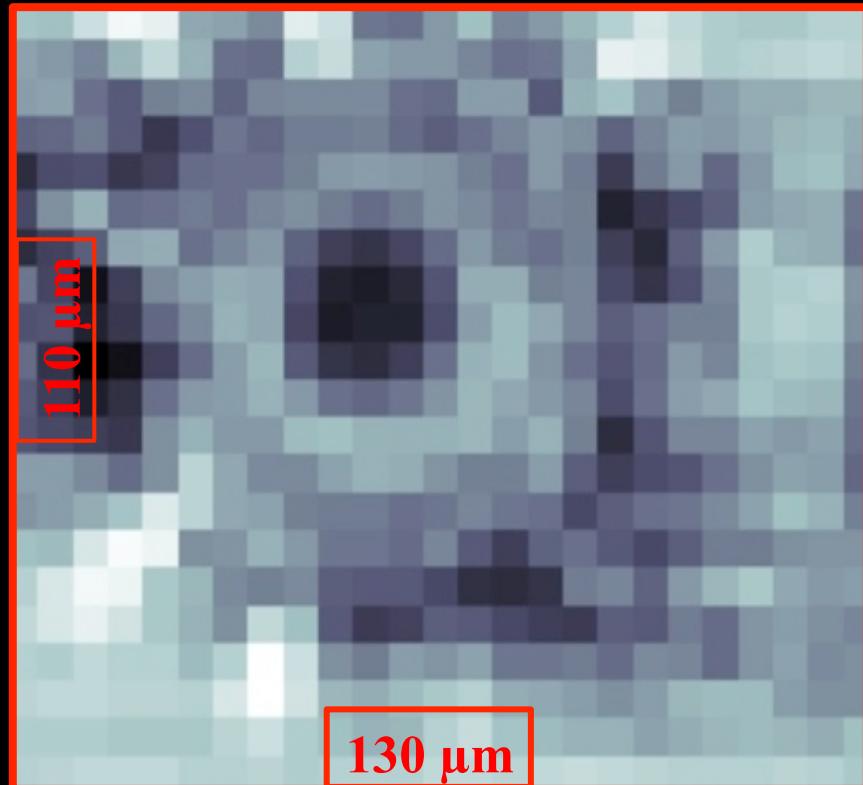
Développement méthodologique et applications

Evaluation de la Ptychographie

Paramètre du scan

- 22 x 26 pixels
- Step 5 μm

Image de transmission par balayage



Phase : Reconstruction par Ptychographie



Taille pixel reconstruit 350 nm

Remerciements

NANOSCOPIUM

- A. Somogyi
- J.P. Samama
- G. Baranton
- S. Chaouchi
- V. Leroux
- A. Bergamaschi
- G. Jacquy

Metrologie

- P. Mercère
- P. Da Silva

PX1

- A. Thompson (Dir)
- P. Legrand

Psiché

- J.P. Itié

D2AM

- N. Boudet
- J.F. Berar

Equipe FLYSCAN / ICA

- N. Leclercq
- J. Berthault
- F. Langlois
- S. Poirier
- A. Buteau
- S. Lé
- A. Nourredine

Groupe détecteurs

- S. Hustache (Com)
- M. Bordessoule
- T. Bucaille (Adm)
- A. Dawiec
- K. Desjardins
- B. Kanouté
- C. Menneglier

Groupe Instru

- F. Picca
- ECA
- Y.M. Abiven
- S. Zhang



Inst. Curie

- S. Marco
- C. Messaoudi

IPGP

- P. Philippot