



list
cea tech



cea

Méthodes de caractérisation de la tache focale des générateurs RX de type micro et nano foyer : contribution à l'évolution de la norme EN 12543

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



16 mai 2022



NANOXPOT

This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

18NRM07 NanoXSpot



SOMMAIRE

- 1. Contexte**
- 2. Evaluation de l'impact des imperfections de fabrication des mires**
- 3. Algorithmes de caractérisation de la tache focale**
- 4. Outil d'analyse et procédure de validation**
- 5. Conclusions**

Projet NanoXSpot @BAM/PTB @CEA

Mesure et caractérisation de la tache focale des générateurs RX jusqu'à l'échelle nanométrique



Problématique: une source RX (générateur/tube) avec un foyer non-punctuel produit un flou sur les images

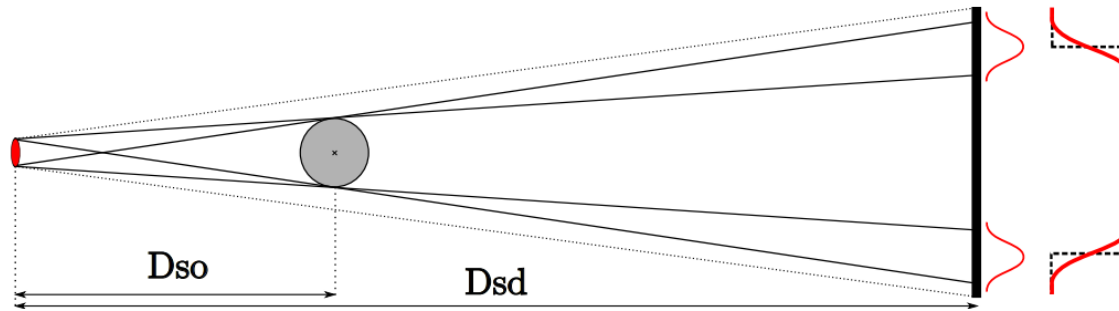
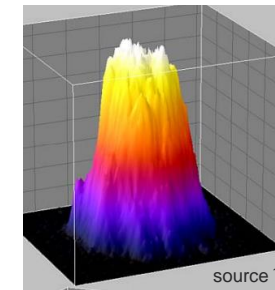
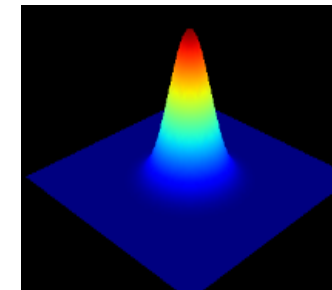


Illustration (en 2D) de l'effet de flou géométrique produit par une source non-punctuelle



Exemples de distribution d'intensité

Objectifs du projet: proposer des méthodes de mesure de taille et de caractérisation de la forme de la tache focale jusqu'à des tailles de l'ordre de $0,1 \mu\text{m}$ (nano-foyer)

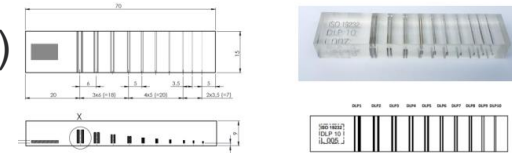
Découpage en lots:

- WP1: Evaluation méthodes
- WP2: Caractérisation mires
- WP3: Développement algorithmes
- WP4: Validation expérimentale

Principes et méthodes de mesure:

- Analyse d'une image obtenue avec une mire (ex: bord franc, duplex, paires de lignes, trous, etc.)
- Séparation de l'effet source non-ponctuelle des effets détecteur (FTM détecteur prise en compte – mesure séparée)

Duplex Plate IQI¹



Normes: EN 12543-x et ASTM E 1165 → limitation : applicables pour tailles de foyer > 5 μm

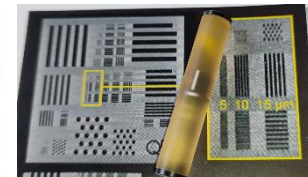
Evaluation initiale:

Criteria	Siemens star	Line patterns	Disc/hole gauges
Availability	NTT, JP – good Zoneplates.com, UK – custom	JIMA – good Hi-Co (Microworks) – experimental	Metrology ring gauges (microscopy) – good Micro-fabricated – custom
Integration		Mounted in stable Al-frame, already in common use	
Imaging	High magnification (MTF) Medium magnification (Reconstruction)	High magnification (MTF) Medium magnification (Fit)	Medium magnification High magnification
Evaluation	Custom software (demo prepared by METAS)	Profile tool (MTF) Custom software (JIMAfit, BAM)	Custom software (demo prepared by METAS)
Durability		medium	high

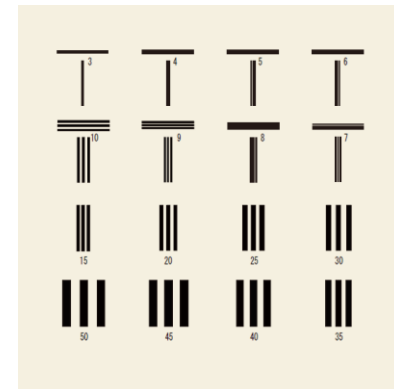
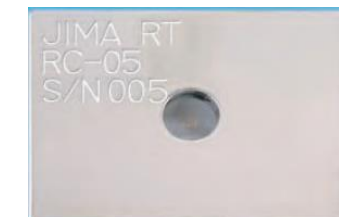
Hole gauges¹



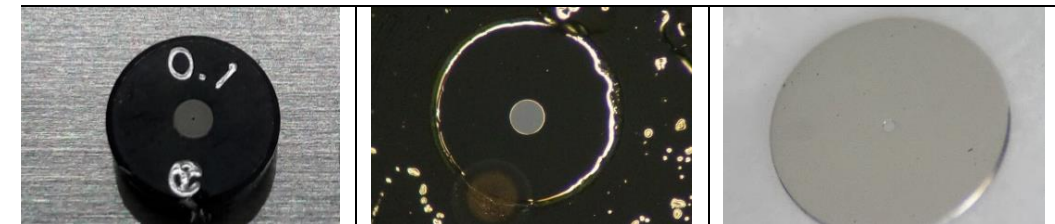
Line group



JIMA RT gauge



Carry ring gauge



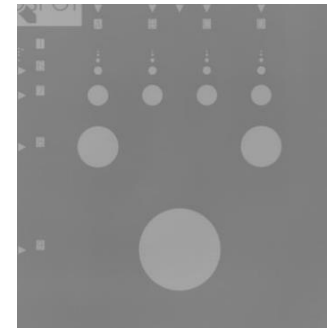
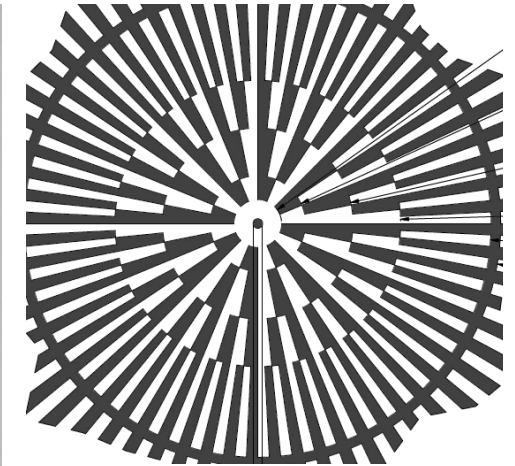
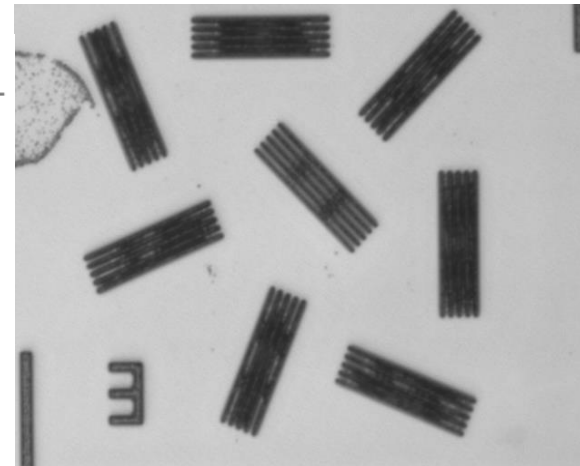
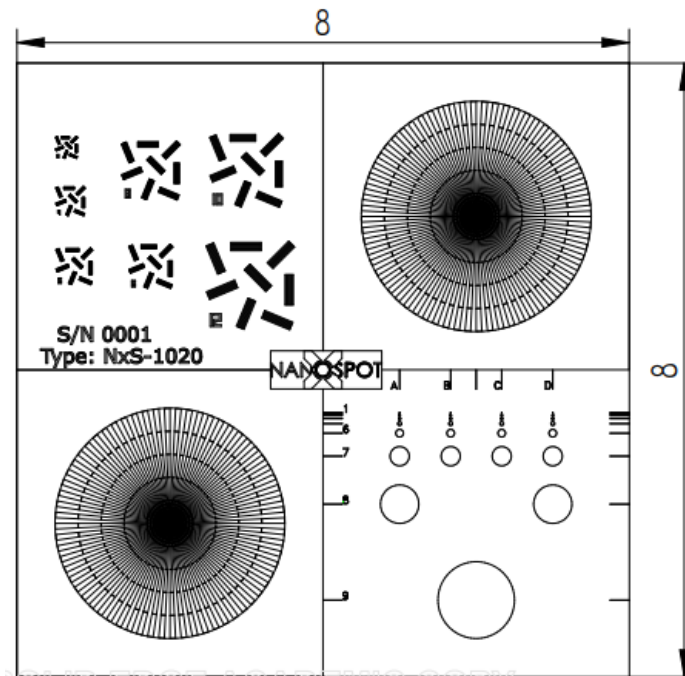
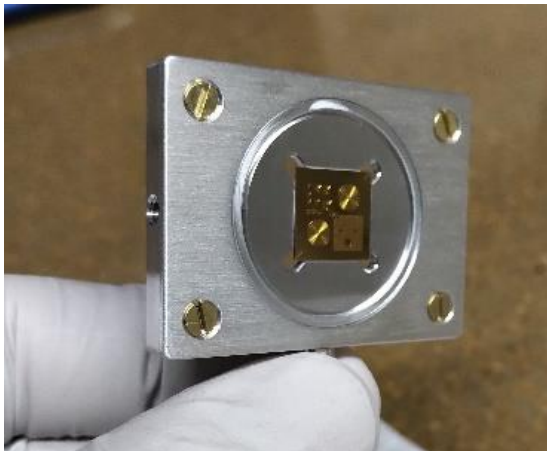
Limitations des mires existantes en termes de résolution spatiale et contraste

→ nouvelle mire proposée par le consortium NanoXSpot : NxS v1 : Au, 8 μm substrat Si (v2 en discussion)

#1 *Line group* : 5 paires avec largeurs 3 μm → 12 μm et 8 orientations

#2, #3 *Star-like* : largeur croissante

#4 *Hole type* : trous avec diamètres de 10 μm à 1 mm



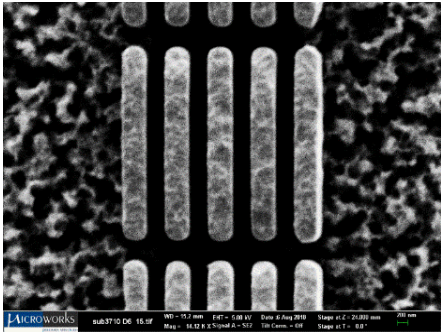
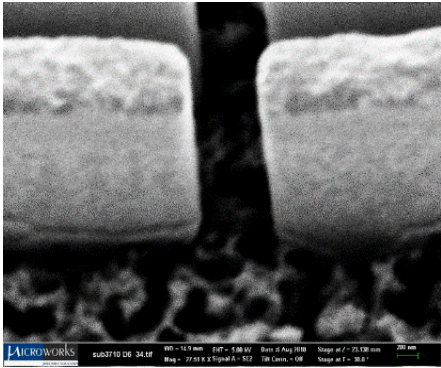
Star-like pattern:
 \varnothing 0.015 mm 0/8 arms
 \varnothing 0.030 mm 8/16 arms
 \varnothing 0.060 mm 16/32 arms
 \varnothing 0.090 mm 32/64 arms
 \varnothing 0.150 mm 64/64 arms
 ...
 \varnothing 3.000 mm 64/0 arms

SOMMAIRE

1. Contexte
- 2. Evaluation de l'impact des imperfections de fabrication des mires**
3. Algorithmes de caractérisation de la tache focale
4. Outil d'analyse et procédure de validation
5. Conclusions

Problématique : les mires ne sont pas parfaites et l'influence sur la mesure à évaluer → via simulation

Approche: modification des CAO pour inclure des imperfections → 3 niveaux: attendu, moyen et extrême



Exemples d'images SEM d'une mire

NxS Q1 - Line groups (3 μm)

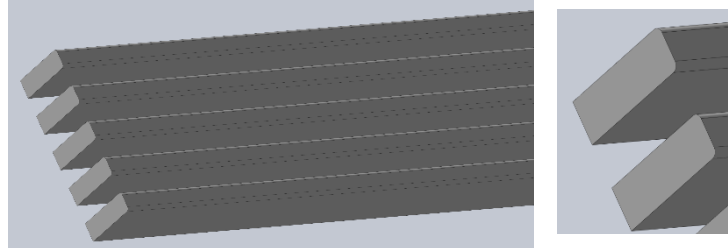
1. Line bending (\pm): 0.05 μm , 0.1 μm , 0.3 μm



2. Line waviness (\pm): 0.05 μm , 0.1 μm



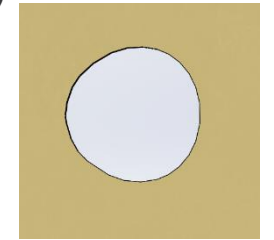
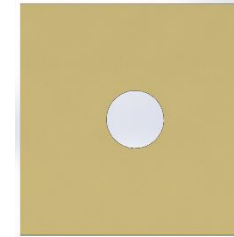
3. Corner roundness (radius): 0.1 μm , 0.5 μm , 1.0 μm



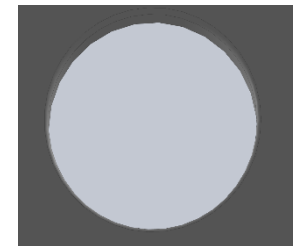
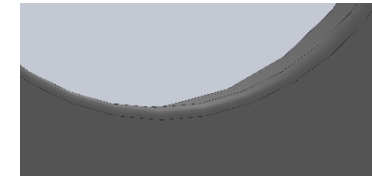
4. Thickness variation between similar gauges :
9 μm (reference), 7 μm , 11 μm

NxS Q4 – Hole gauge

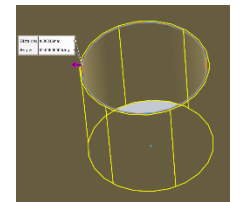
1. Circle roundness (Δ_{max}) : 0.03 μm , 0.1 μm , 1 μm
→ 3 undulations per revolution (UPR)



2. Corner roundness (radius) : 1 μm , 2 μm



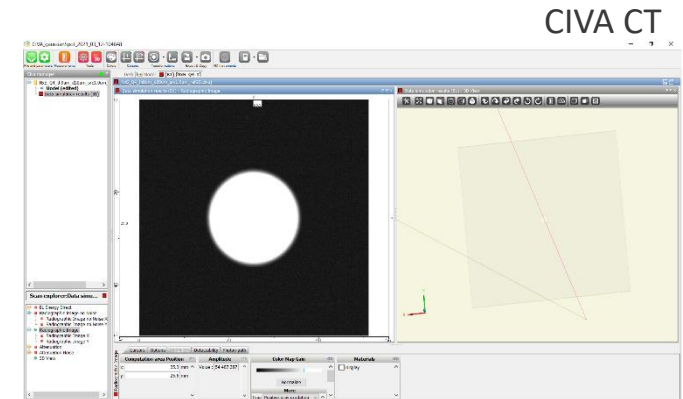
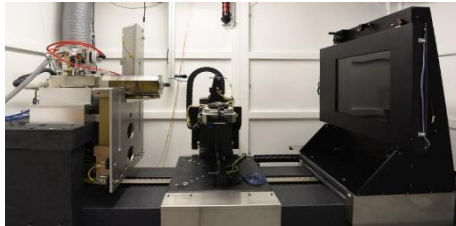
3. Edge (side wall) angle : 1°, 2°



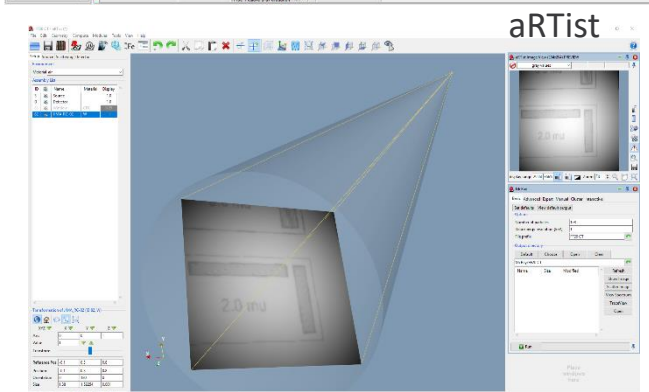
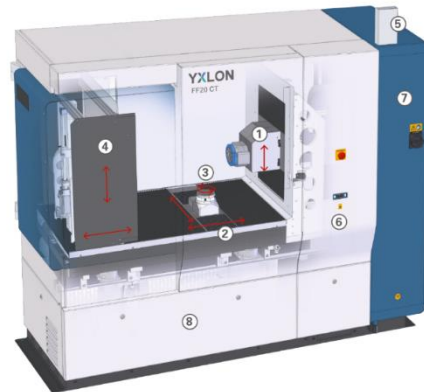
4. Thickness variation between similar gauges:
9 μm (reference), 7 μm , 11 μm

Modélisation des systèmes expérimentales représentatifs:

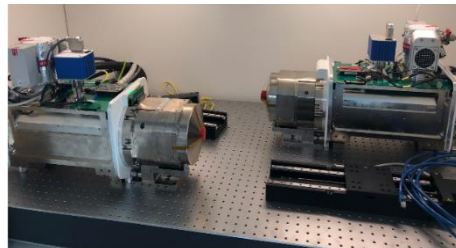
1. METAS CT (μ foyer & PerkinElmer 1611 : 100 μ m pitch)
Modélisé par CEA avec le logiciel CIVA CT

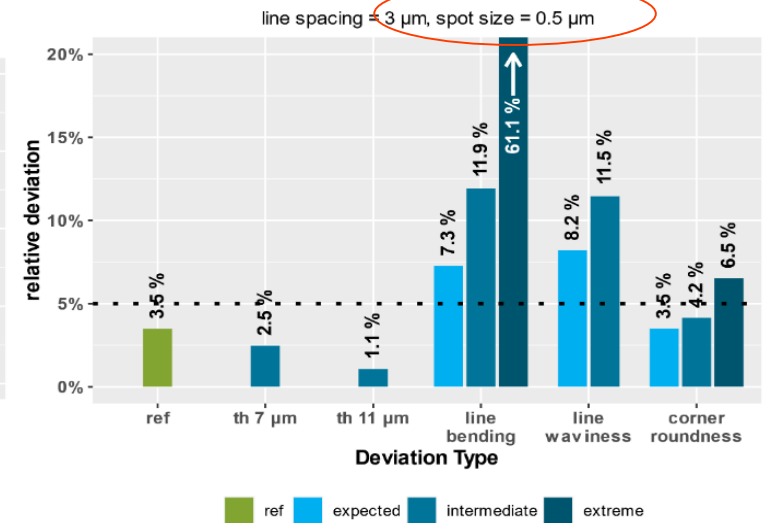
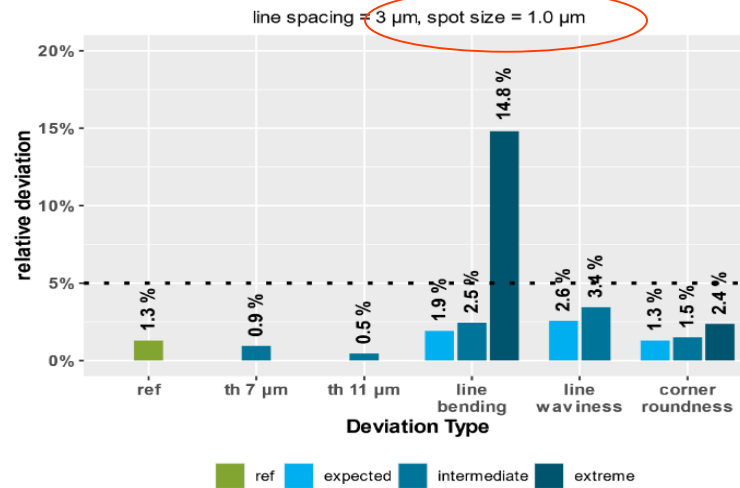
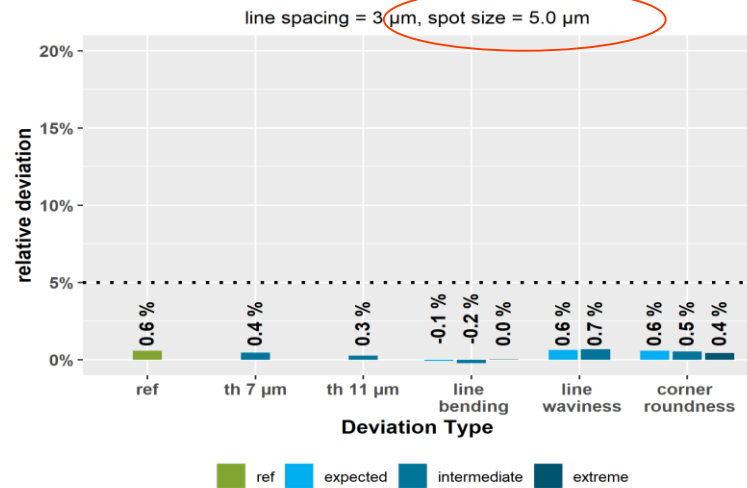
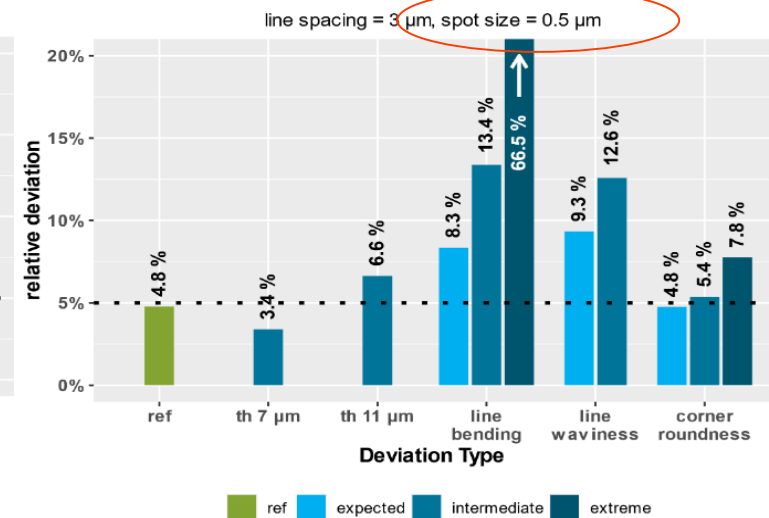
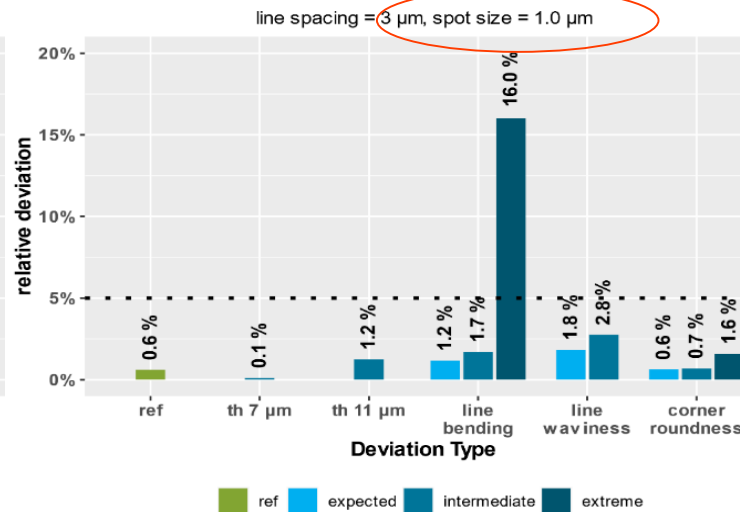
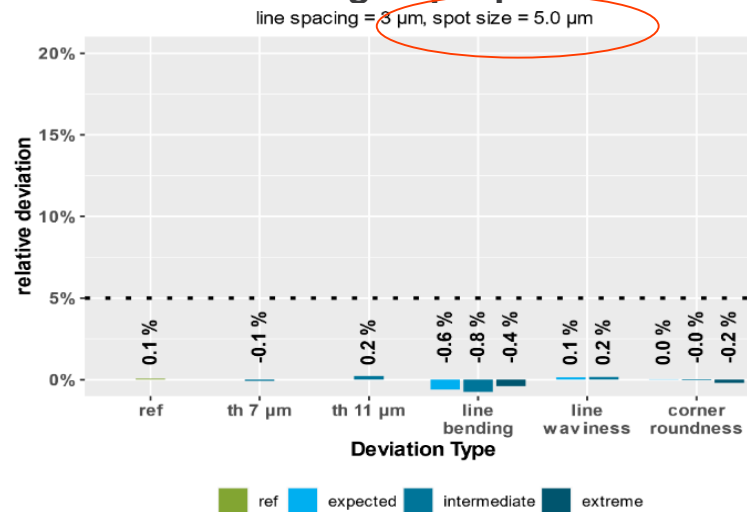


2. Yxlon FF20CT (μ foyer & Yxlon 4343CT : 150 μ m pitch)
Modélisé par BAM avec le logiciel aRTist



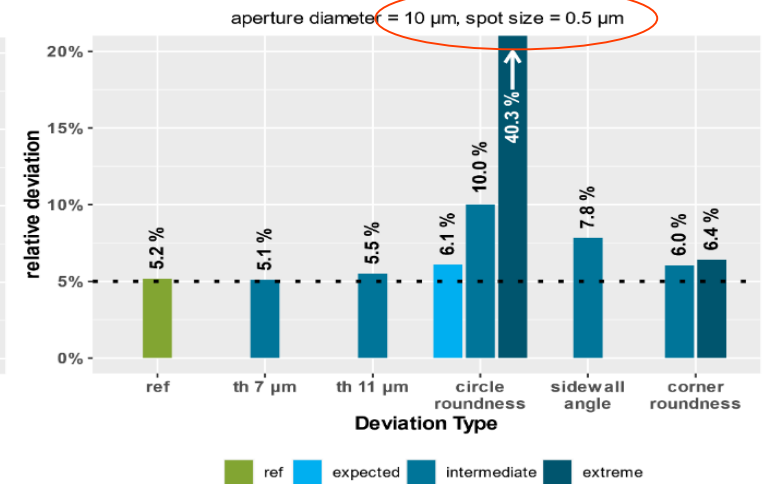
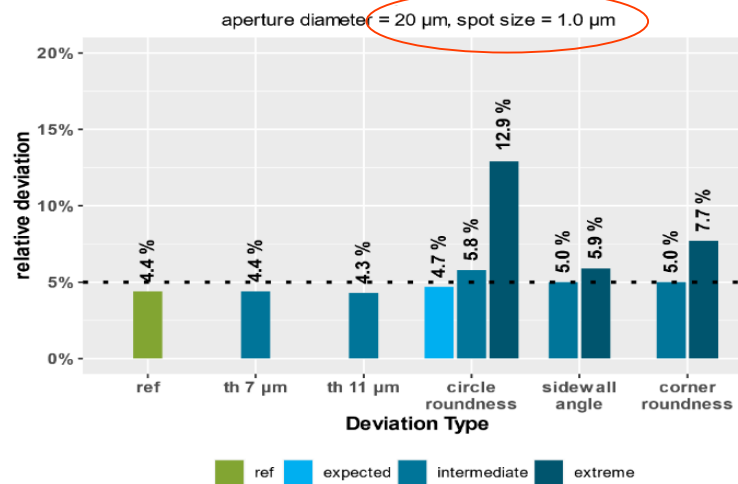
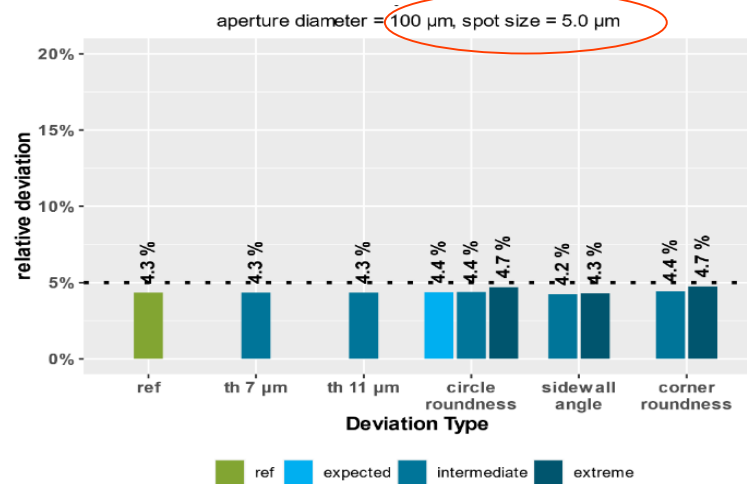
3. Excillum - Nanotube Metrology Setup
(nanofoyer & Actaeon 100 μ m pitch)
Modélisé par Excillum avec logiciel interne (XRaySimulator)



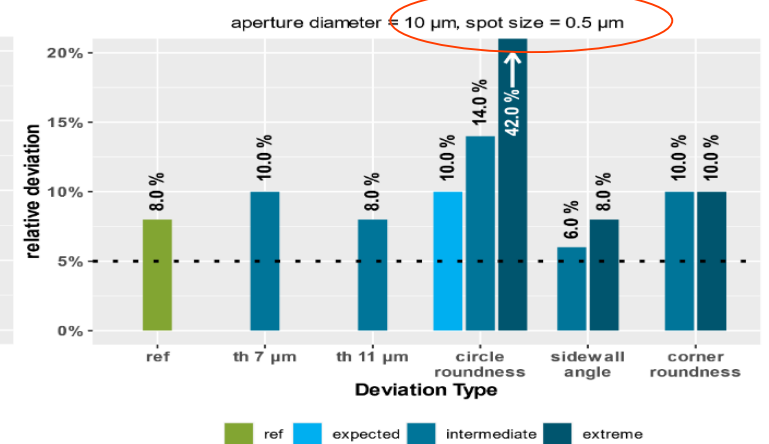
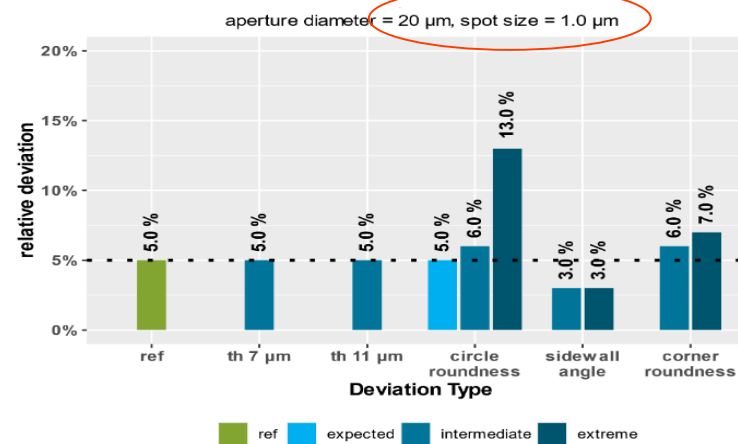
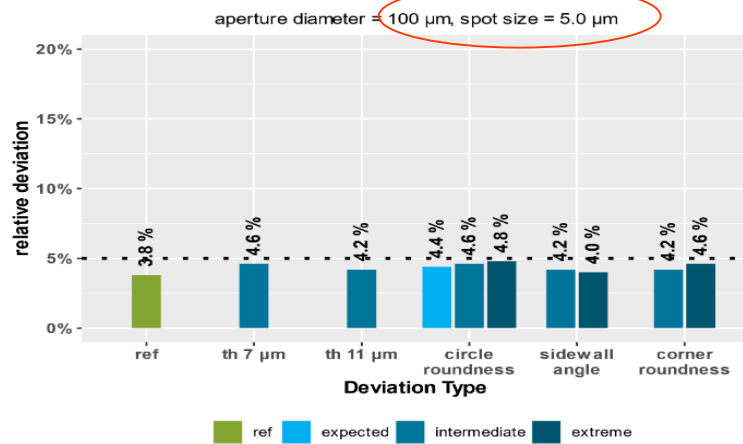
Résultats : Système METAS CT : line group 3 μm Système YXLON : line group 3 μm 

→ Erreur relative <5% sauf pour les cas extrêmes & source 0.5 μm : échantillonnage (taille pixel détecteur & agrandissement hors recommandations)

Résultats : Système METAS CT : hole gauge



Système YXLON : hole gauge



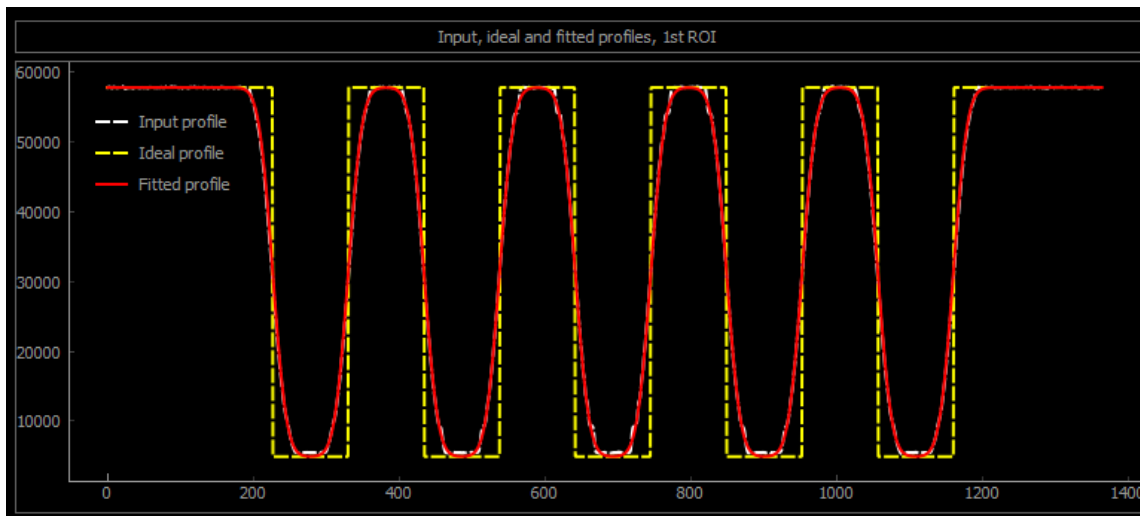
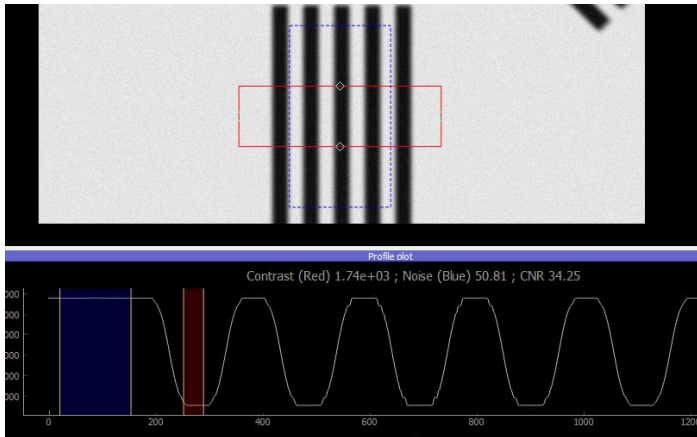
→ Erreur relative $\leq 5\%$ sauf pour les cas extrêmes & source 0.5 μm : échantillonnage (taille pixel détecteur & agrandissement hors recommandations)

SOMMAIRE

1. Contexte
2. Evaluation de l'impact des imperfections de fabrication des mires
- 3. Algorithmes de caractérisation de la tache focale**
4. Outil d'analyse et procédure de validation
5. Conclusions

#1 Mires de type groupe de lignes

1.1 Evaluation basée sur l'ajustement d'une fonction sur le profile – min(LSF * profile)



$$LSF(x) = \frac{\eta}{\pi \cdot a} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2} + (1 - \eta) \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left(-\ln 2 \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)$$

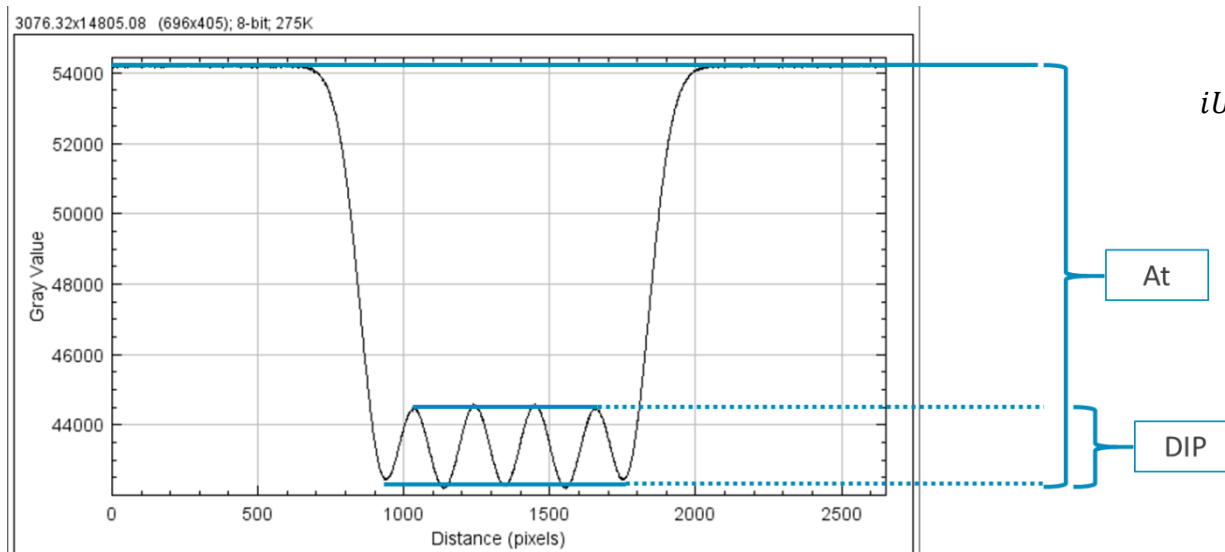
$$S_{LSF} = \frac{M}{M - 1} \cdot \sqrt{(1.24 \cdot FWHM)^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot iSR_b^{detector}\right)^2}$$

$$S_{ERF} = \frac{M}{M - 1} \cdot \sqrt{(ERV)^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot iSR_b^{detector}\right)^2}$$

#1 Mires de type groupe de lignes

1.2 Evaluation basée sur la modulation du profile (DIP)

→ Deux images nécessaires avec modulation différente <20% et >20%



$$iU_{image} = 2 \cdot L_w(< 20\%) + 2 \cdot (20\% - DIP(< 20\%)) \cdot \frac{L_w(> 20\%) - L_w(< 20\%)}{DIP(> 20\%) - DIP(< 20\%)}$$

$$M = \frac{L(\text{pixels}) \cdot PP_{detector}}{L(\mu m)}$$

$$s = \frac{M}{M - 1} \cdot \sqrt{\left(iU_{image}(20\%)\right)^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot iSR_b^{detector}\right)^2}$$

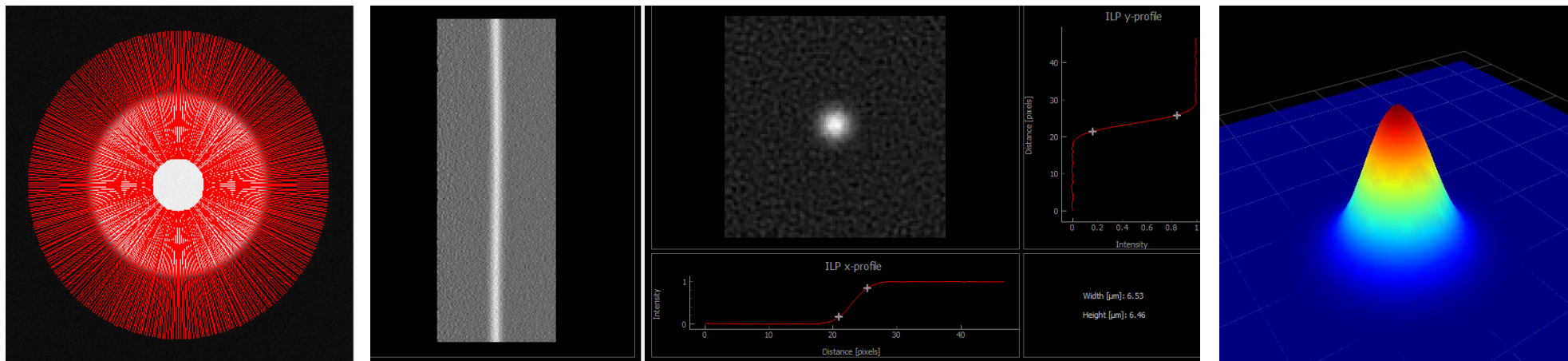
#2 Mires de type trous

2.1 Reconstruction de la tache focale par retro-projection (*focal spot reconstruction* – basée sur l'approche ²)

#1 extraction pseudo-sinogramme

#2 retro-projection

#3 ajustement fonction 2D → dimension foyer & distribution intensité en 2D



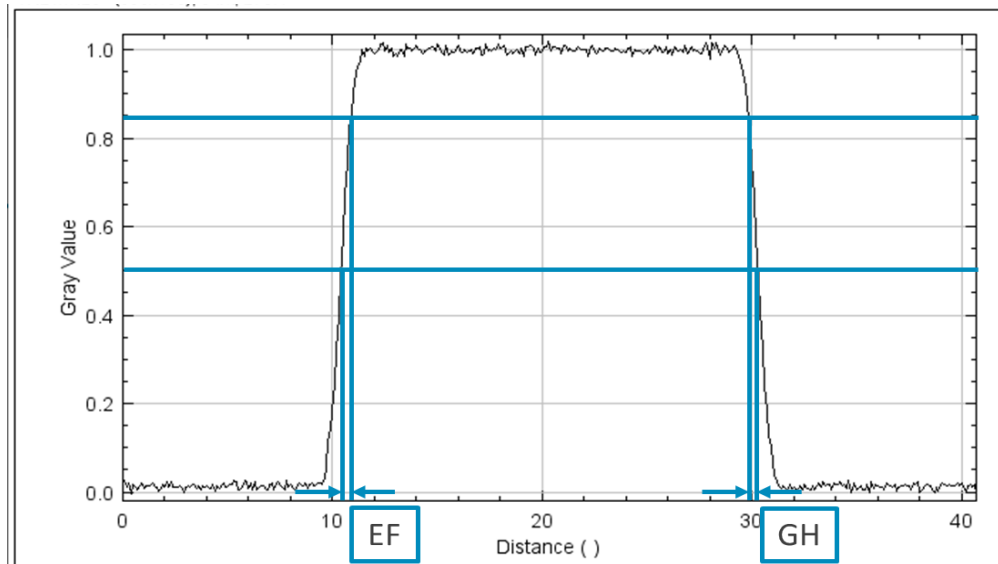
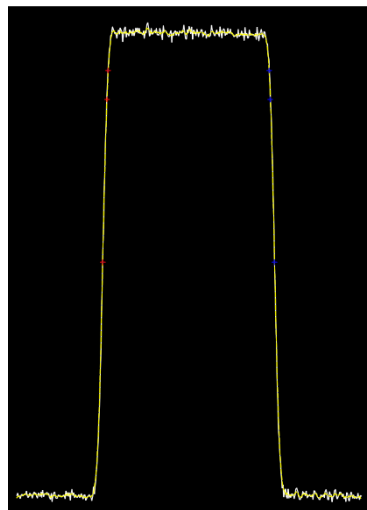
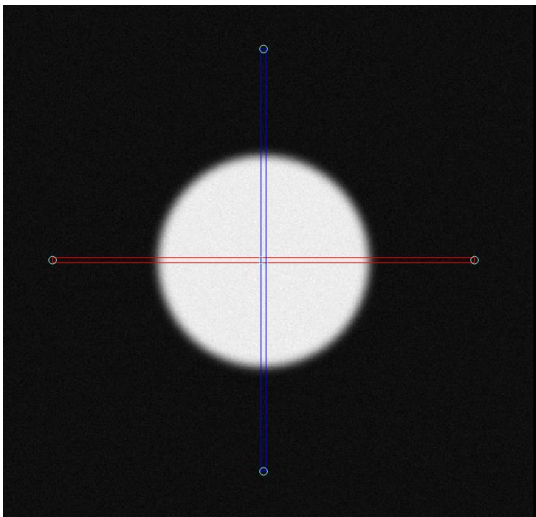
$$s_{LSF} = \frac{M}{M-1} \cdot \sqrt{(1.24 \cdot FWHM)^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot iSR_b^{detector}\right)^2}$$

$$s_{ERF} = \frac{M}{M-1} \cdot \sqrt{(ERV)^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot iSR_b^{detector}\right)^2}$$

² Di Domenico et al., Med. Phys. 43 (1), 2016

#2 Mires de type trous

2.2 Evaluation basée sur l'analyse « double bord franc »



$$ERV_{50} = 1.47 \cdot (EF + GH)$$

$$S_{ERV_{50}} = \frac{M}{M-1} \cdot \sqrt{(ERV_{50})^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot iSR_b^{detector}\right)^2}$$

#3 Mires de type étoile

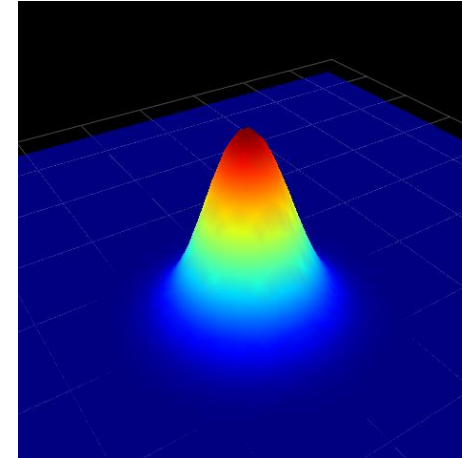
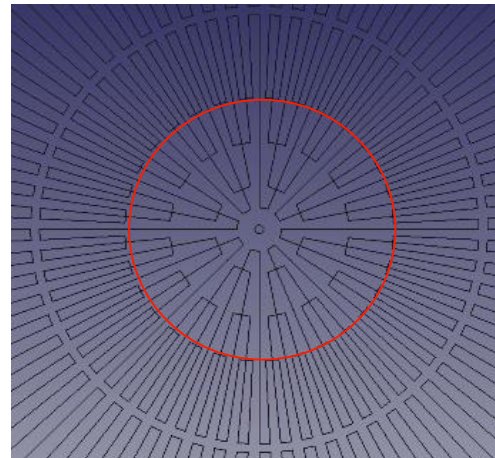
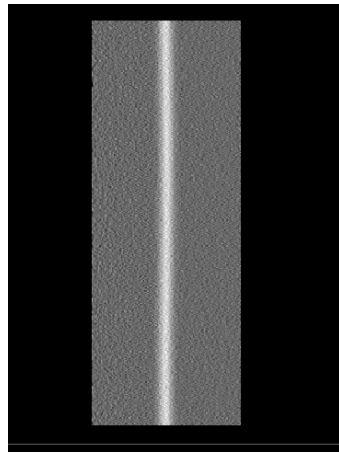
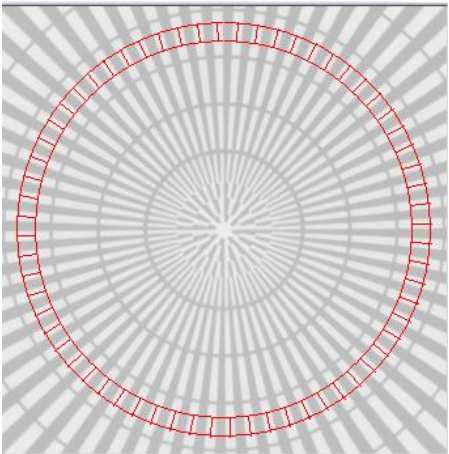
3.1 Extension de la méthode par retro-projection

#1 extraction pseudo-sinogramme

#2 calibration taille pixel sur dimension connue (diamètre)

#3 retro-projection

#4 ajustement pic 2D → dimension tache & distribution 2D intensité



$$s_{LSF} = \frac{M}{M-1} \cdot \sqrt{(1.24 \cdot FWHM)^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot iSR_b^{detector}\right)^2}$$

$$s_{ERF} = \frac{M}{M-1} \cdot \sqrt{(ERV)^2 - \left(\frac{2}{M} \cdot iSR_b^{detector}\right)^2}$$

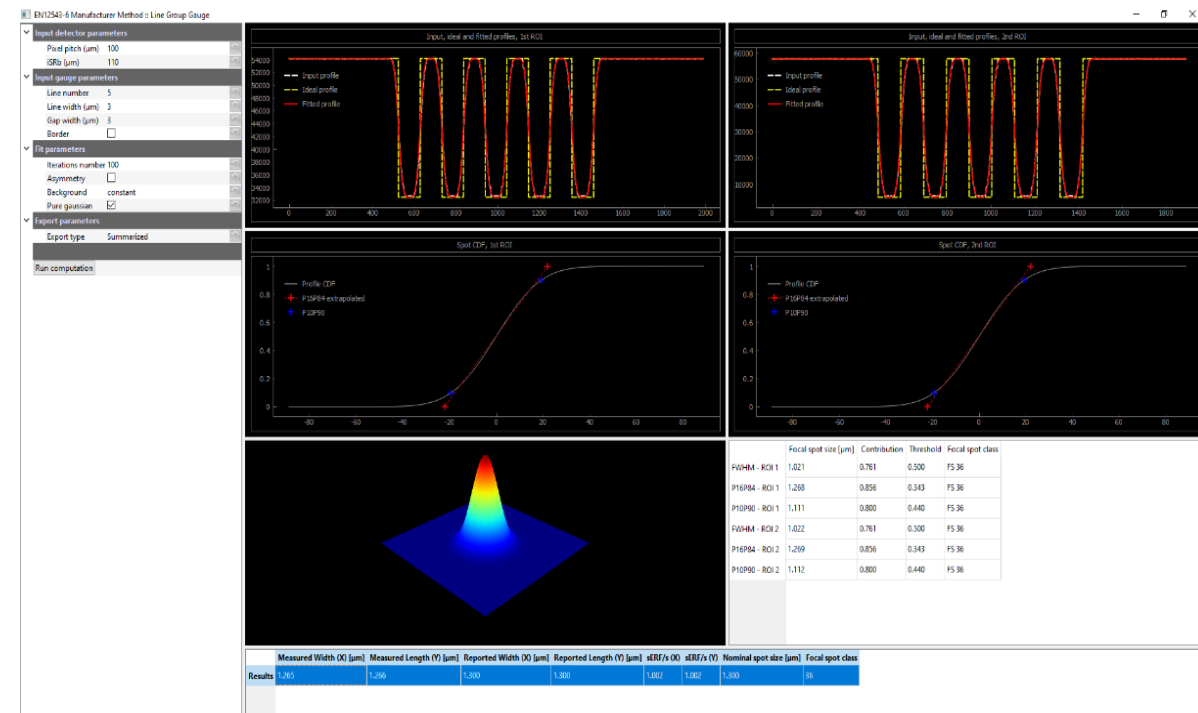
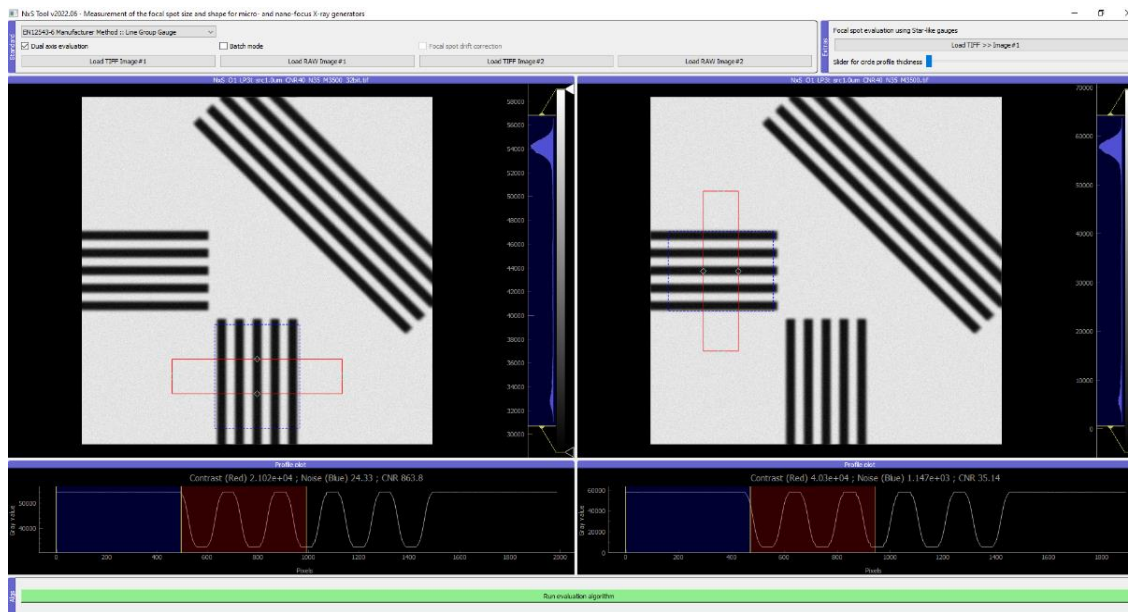
SOMMAIRE

1. Contexte
2. Evaluation de l'impact des imperfections de fabrication des mires
3. Algorithmes de caractérisation de la tache focale
- 4. Outil d'analyse et procédure de validation**
5. Conclusions

NxS Tool

Version 2022.07 : [NanoXSpot Project - NxS Tool : v2022.07 \(cea.fr\)](https://cea.fr/nanoxspot)

User Manual : [NanoXSpot Project - NxS Tool User Manual \(cea.fr\)](https://cea.fr/nanoxspot)



- #1. Choix méthode
- #2. Chargement images et sélection ROI(s)
- #3. Algorithme évaluation → nouvelle fenêtre
- #4. Paramètres : gauge, fit and export + *Run algorithm*
- #5. Résultats évaluation : visualisation dans la fenêtre et fichier texte sur le disque

→ *démonstration*

Procédure de validation : vérification du résultat sur images simulées par comparaison *FWHM***A. Robustesse aux variations de paramètres****Line group**

1. LP10 (10 μm)
 - Source diameter: 5.0, 10.0 μm
 - Magnification factor (M): 280, 560, 1120
 - Noise (CNR): 20, 40, 60
2. LP3 (3 μm)
 - Source diameter: 0.5, 0.8, 1.0, 3.0 μm
 - Magnification factor (M): 700, 1120, 2240, 3500, 4000, 5600
 - Noise (CNR): 20, 40, 60
3. LP1 (1 μm)
 - Source diameter: 0.1, 0.3 μm
 - Magnification factor (M): 3500, 5600
 - Noise (CNR): 20, 40, 60

Hole gauges

1. Diameter 100 μm
 - Source diameter: 5, 10, 20, 30 μm
 - Magnification factor (M): 200
 - Noise (CNR): 10, 20, 40, 60
2. Diameter 20 μm
 - Source diameter: 0.5, 0.8, 1.0 μm
 - Magnification factor (M): 1000
 - Noise (CNR): 10, 20, 40, 60
3. Diameter 10 μm
 - Source diameter: 0.3, 0.5, 0.8, 1.0 μm
 - Magnification factor (M): 2000
 - Noise (CNR): 10, 20, 40, 60

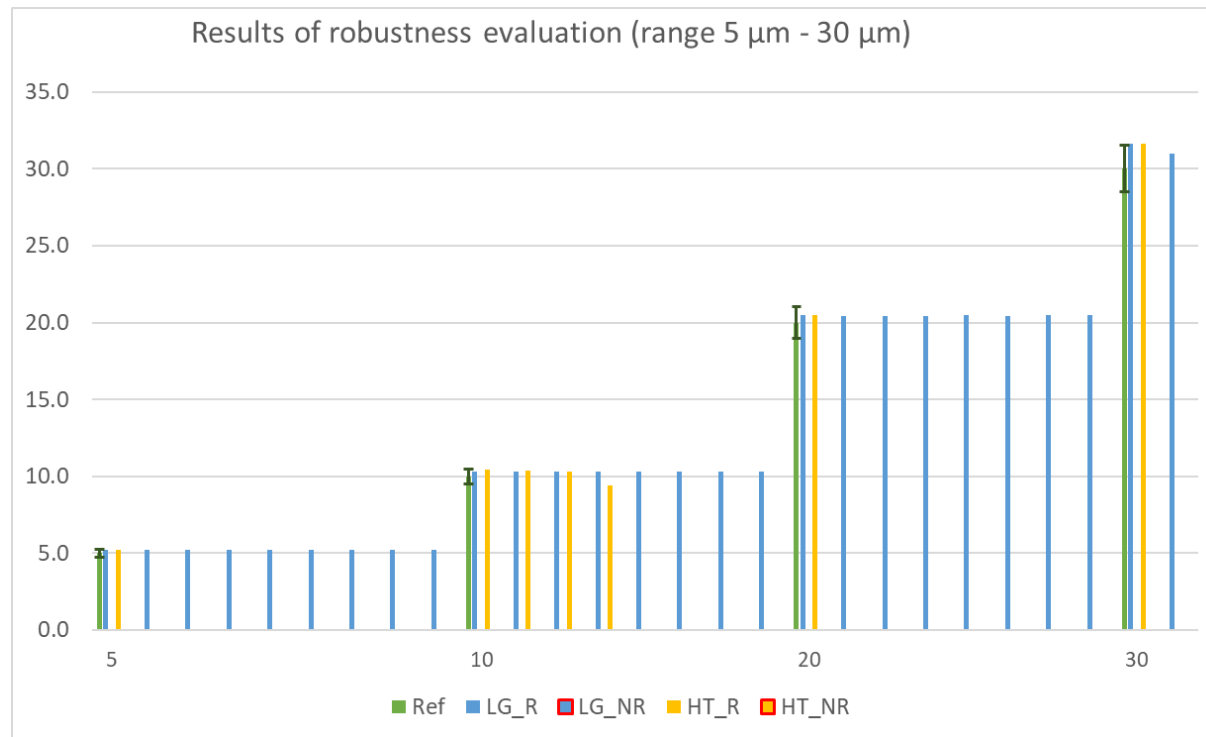
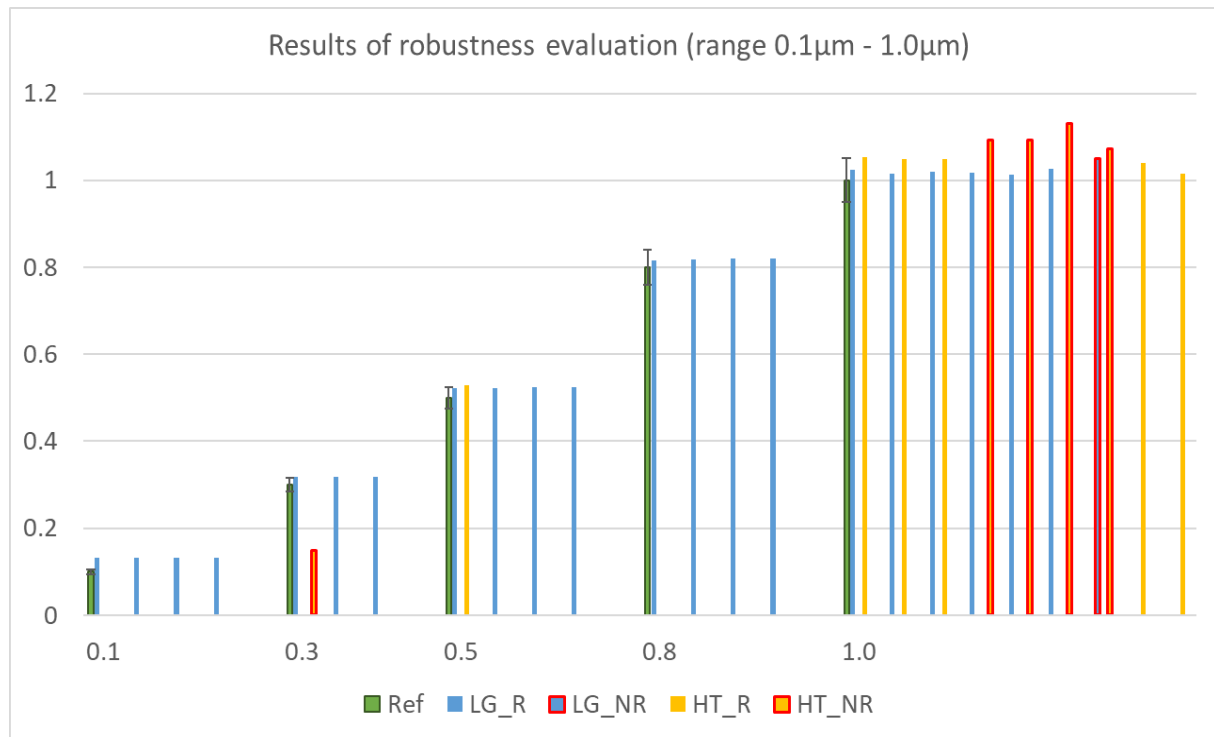
B. Validation**Line group**

1. LP10 (10 μm)
 - Source diameter: 5.0, 10.0 μm
 - Magnification factor (M): 280, 560, 1120
 - Transversal misalignment: 1x and 2x of the estimated source diameter
 - Rotation: 1°, 2°
 - Vertical tilt: 1°, 2°
2. LP3 (3 μm)
 - Source diameter: 0.5, 0.8, 1.0, 3.0 μm
 - Magnification factor (M): 700, 1120, 2240, 3500, 4000, 5600
 - Transversal misalignment: 1x and 2x of the estimated source diameter
 - Rotation: 1°, 2°
 - Vertical tilt: 1°, 2°
3. LP1 (1 μm)
 - Source diameter: 0.1, 0.3 μm
 - Magnification factor (M): 3500, 5600
 - Transversal misalignment: 1x and 2x of the estimated source diameter
 - Rotation: 1°, 2°
 - Vertical tilt: 1°, 2°

Hole gauges

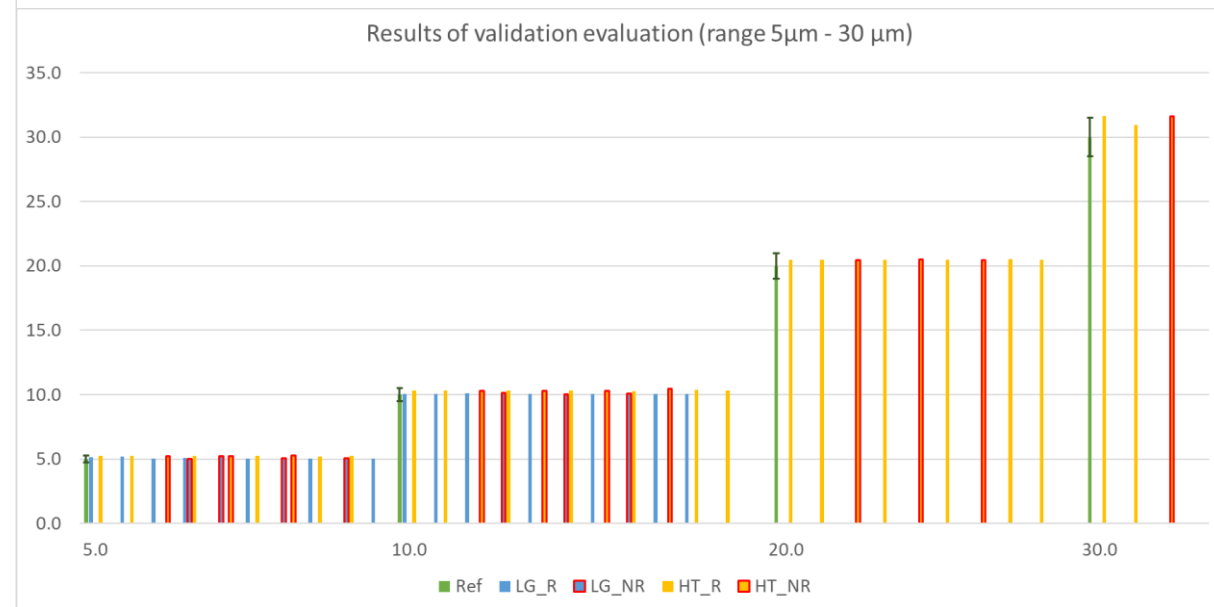
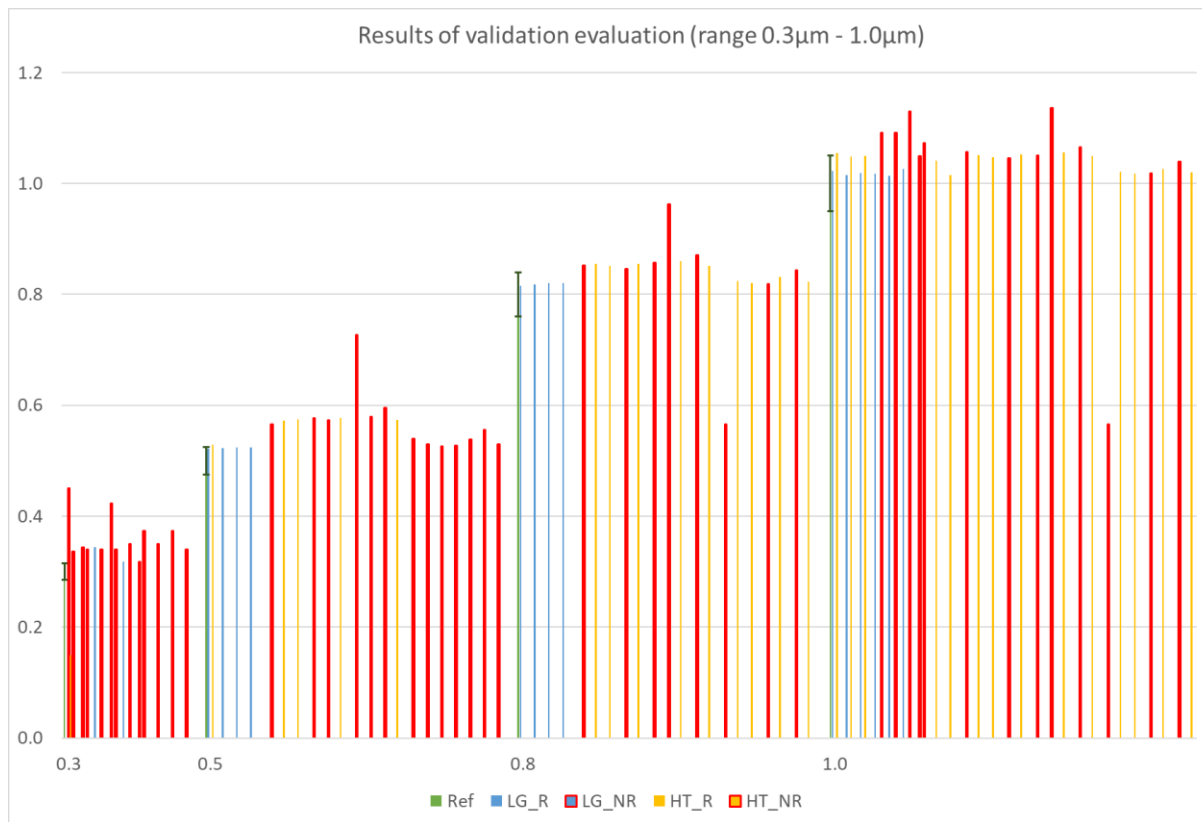
1. Diameter 100 μm
 - Source diameter: 5, 10, 20, 30 μm
 - Magnification factor (M): 200
 - Transversal misalignment: 1x and 2x of the estimated source diameter
 - Rotation: 1°, 2°, Vertical tilt: 1°, 2°
2. Diameter 20 μm
 - Source diameter: 0.5, 0.8, 1.0 μm
 - Magnification factor (M): 1000
 - Transversal misalignment: 1x and 2x of the estimated source diameter
 - Rotation: 1°, 2° Vertical tilt: 1°, 2°
3. Diameter 10 μm
 - Source diameter: 0.3, 0.5, 0.8, 1.0 μm
 - Magnification factor (M): 2000
 - Transversal misalignment: 1x and 2x of the estimated source diameter
 - Rotation: 1°, 2°, Vertical tilt: 1°, 2°

Résultats de l'étude de robustesse aux variations de paramètres



→ Conclusions: erreur relative <5% pour les cas respectant les recommandations

Résultats de l'étude de validation



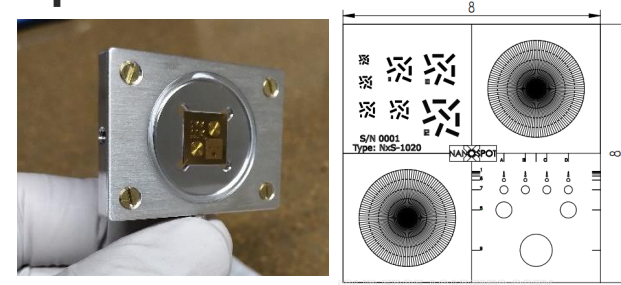
- Conclusions: Les méthodes et l'outil d'analyse répondent aux critères de validation pour les cas respectant les recommandations
Erreur relative <5% , calcul incertitudes en cours
- Validation sur des images expérimentales en cours (2022, sur 7+ systèmes CT)

SOMMAIRE

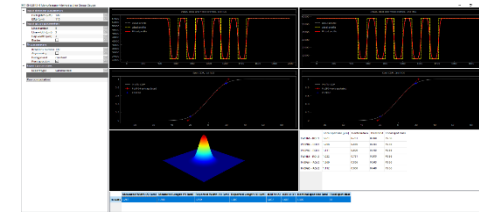
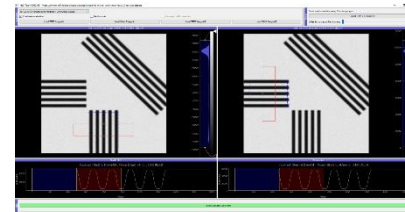
1. Contexte
2. Evaluation de l'impact des imperfections de fabrication des mires
3. Algorithmes de caractérisation de la tache focale
4. Outil d'analyse et procédure de validation
- 5. Conclusions**

Développements et évolutions dans le contexte du projet NanoXSpot

- ✓ Nouvelle mire de mesure proposée
- ✓ Plusieurs méthodes de mesure et caractérisation de la tache focale proposées



- ✓ NxS Tool : logiciel d'analyse intégrant 5 méthodes



- ✓ Propositions pour faire évoluer la norme EN 12543 en cours : 12543-6 & 13543-7 + 12543-2

NxS Tool

Version 2022.07 : [NanoXSpot Project - NxS Tool : v2022.07 \(cea.fr\)](https://cea.fr/nanoxspot-project-nxs-tool-v2022-07)

User Manual : [NanoXSpot Project - NxS Tool User Manual \(cea.fr\)](https://cea.fr/nanoxspot-project-nxs-tool-user-manual)

NanoXSpot @ [BAM/PTB](https://bam.ptb.de)



Merci de votre attention

Questions ?

M. Costin : marius.costin@cea.fr



This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

18NRM07 NanoXSpot



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States