



# Détection des défauts en tomographie X pour la fabrication additive métallique

---

Influence de la composition du matériau, de l'épaisseur et de la résolution

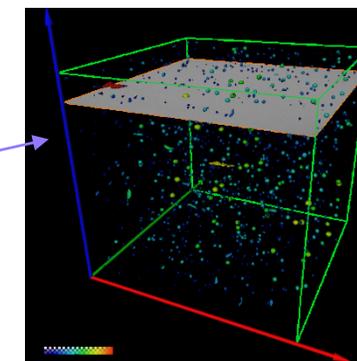
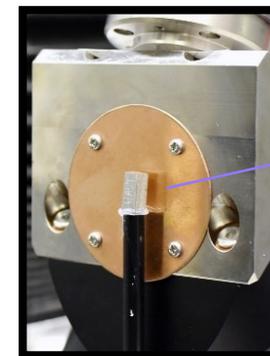
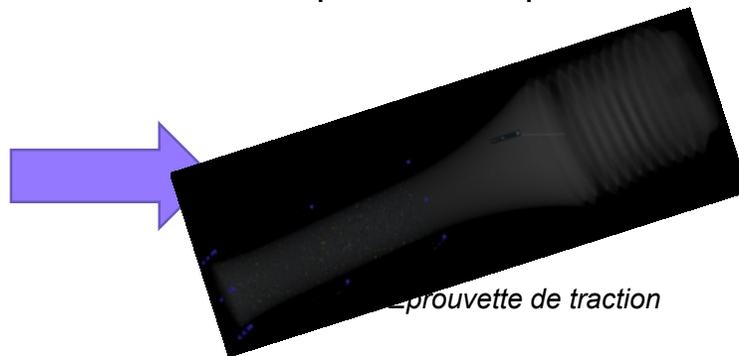
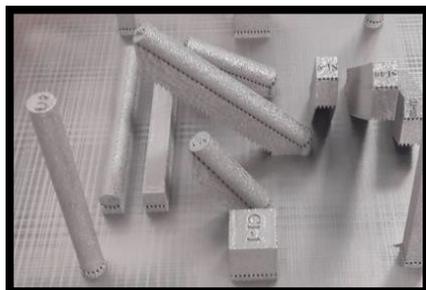
Julien LESSEUR

julien.lesseur@irt-saintexupery.com

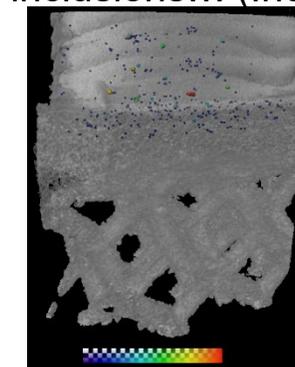
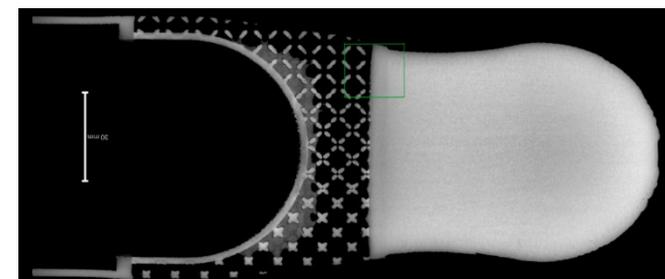
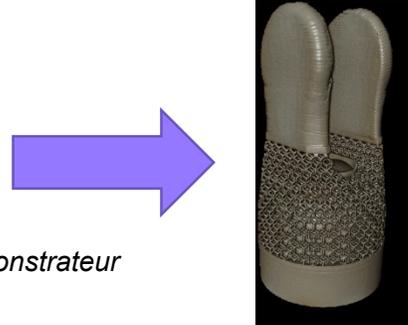
*COMET MAT CND : détection d'endommagement et suivi en fabrication*  
*30 Novembre 2021*

# Introduction

- Fabrication additive (FA) métallique → génération de pièces à géométries complexes souvent difficiles à contrôler
- La tomographie X → moyen de contrôle non destructif 3D des défauts internes qui est de plus en plus utilisé en FA
- Technique employée principalement sur **deux catégories de pièces** :
  - **Eprouvettes** : Analyses à l'échelle locale pour la compréhension des relations microstructure / propriétés physiques (R&D)



- **Partiels de pièces / pièces complètes** : scan globaux pour conformité CAO / détection de pores, inclusions... (Industriel)

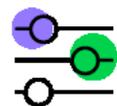


- La détection des défauts en tomographie **est grandement limitée par** :
  - La taille de la pièce et l'épaisseur cumulée de matériau à traverser
  - La composition chimique du matériau

→ **Connaître et évaluer l'influence de ces facteurs est donc primordial**

# Objectifs de l'étude

## Evaluer l'influence de l'épaisseur et de la composition chimique du matériau sur la détection de pores



Tomographie X : technique en transmission sensible à la composition chimique du matériau ( $\nearrow$  numéro atomique  $\blacktriangleright$   $\searrow$  taux de transmission) et à son épaisseur.

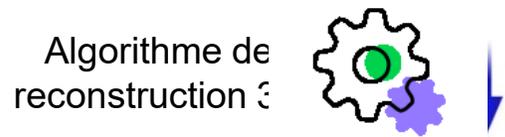
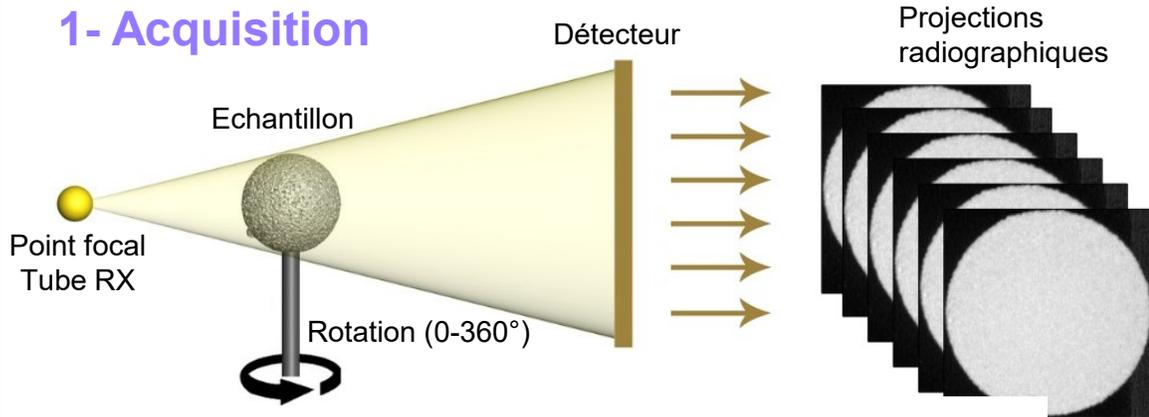
La résolution spatiale définit le niveau de détail observable par le système. Elle varie avec la taille du point focal du tube, la qualité de la reconstruction et le niveau de bruit des images produites.



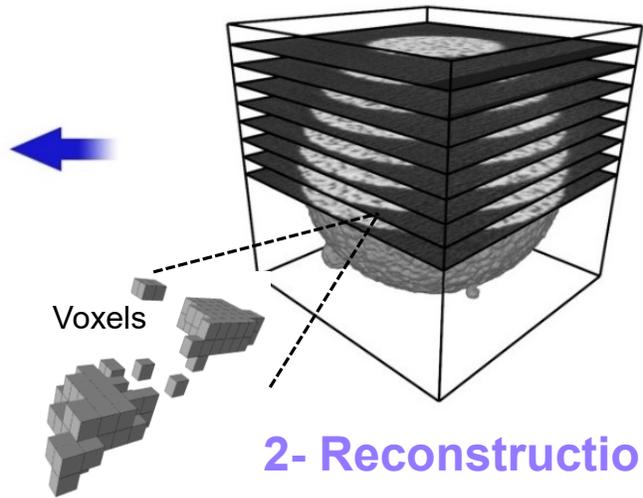
- ▶ Conception d'éprouvettes contenant 10 défauts artificiels classés par taille.
- ▶ Géométrie brute de fabrication cylindrique pour améliorer l'acquisition.
- ▶ Essais sur deux types de matériaux classiquement utilisés : alliage de titane Ti64 et alliage 718.
- ▶ Trois diamètres (5 mm, 15 mm, 25 mm) : évaluation de la détectabilité en fonction de l'épaisseur cumulée.

# Tomographie X : principe de fonctionnement

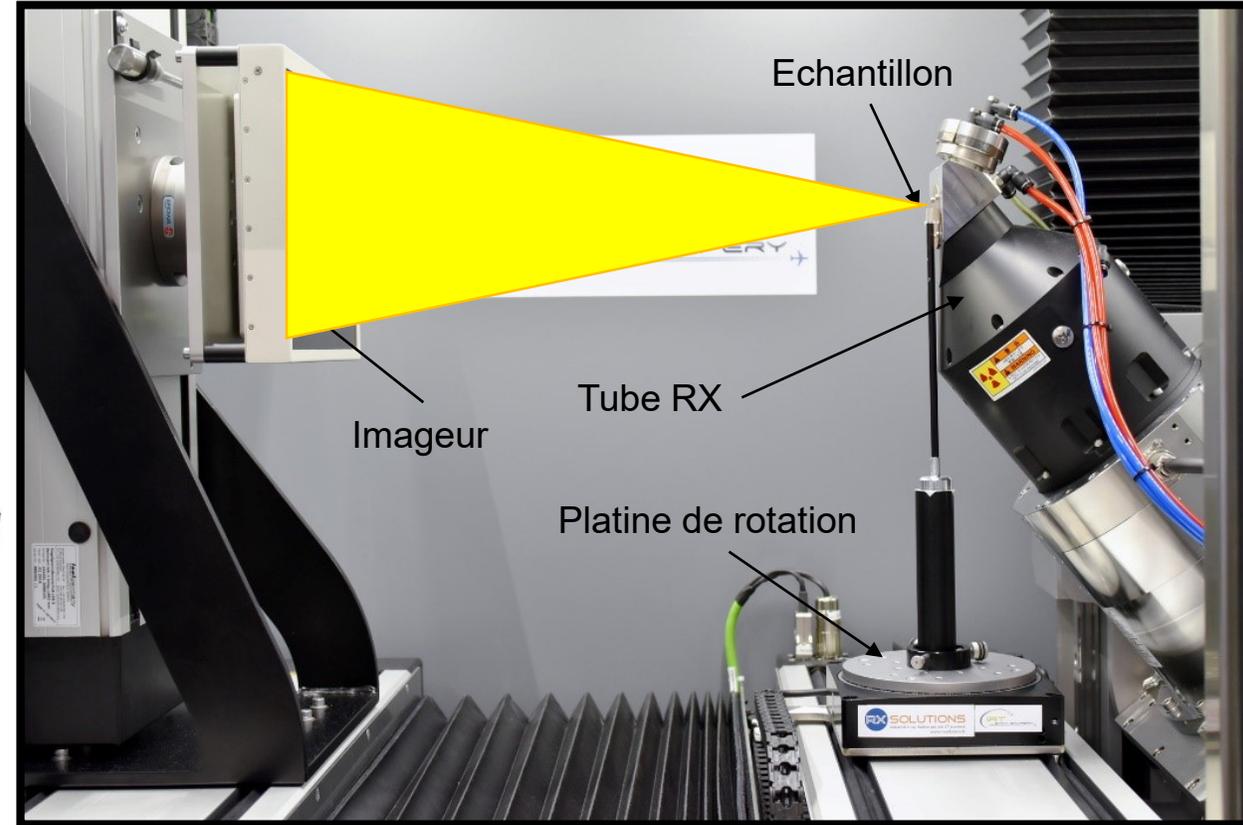
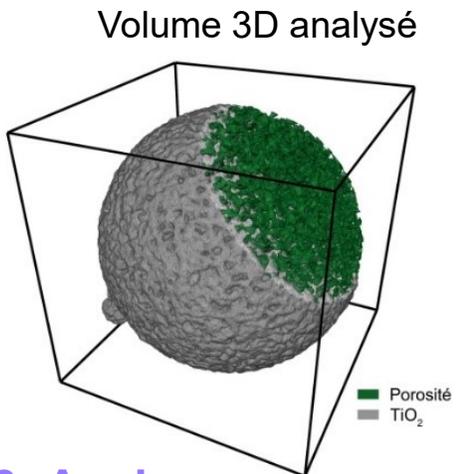
## 1- Acquisition



## 2- Reconstruction

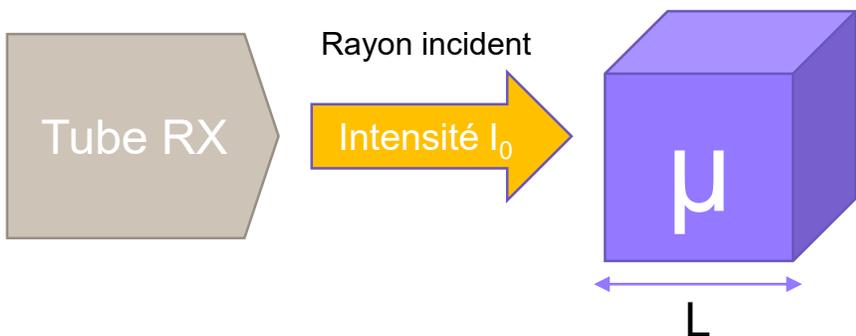


## 3- Analyses



Vue interne du tomographe

# Principe de transmission du signal en tomographie X



Rayon transmis



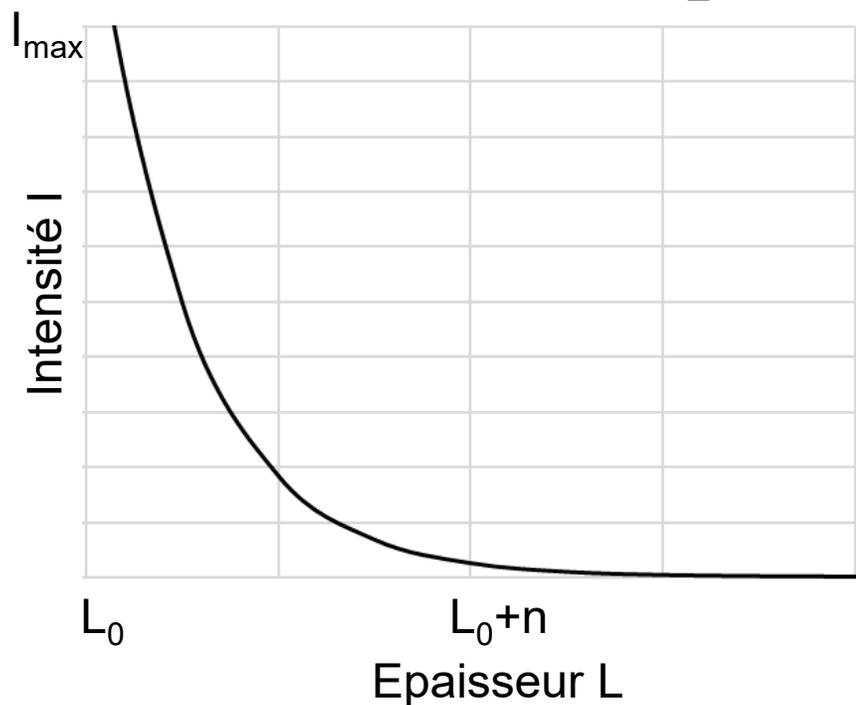
Intensité I avec  $I = I_0 e^{-\mu L}$

\*NG : Niveaux de Gris

Le coefficient d'atténuation linéique  $\mu$  est propre à chaque matériau

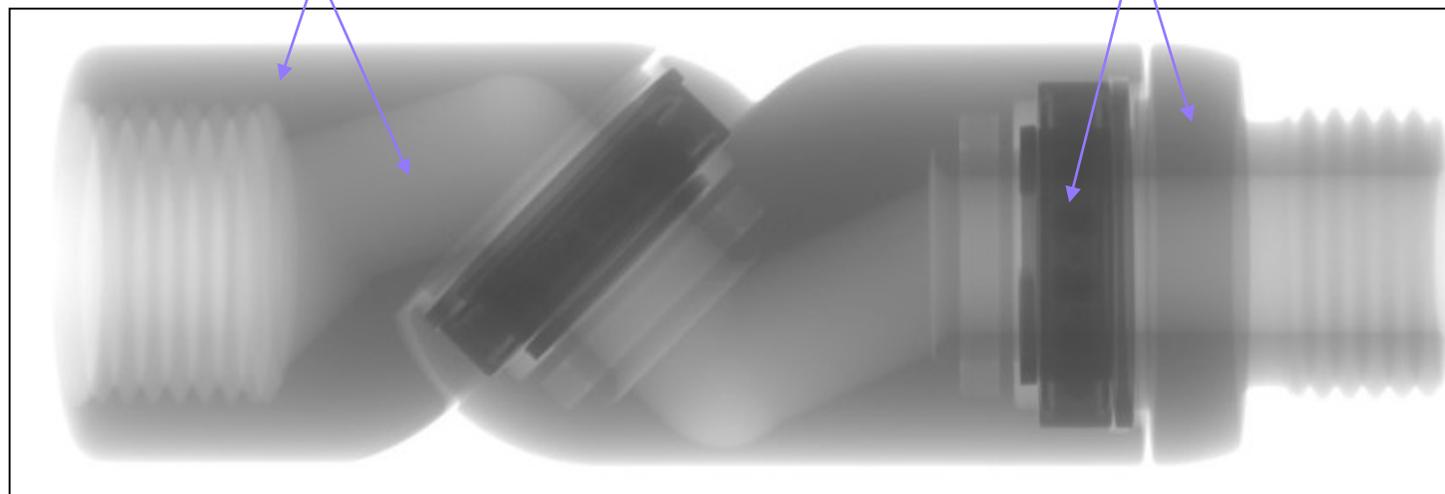
**En radiographie :** \*NG  $\approx f(\text{Epaisseur } L, \text{ Numéro atomique, } E_{\text{photons}})$

**En tomographie :** reconstruction d'une cartographie 3D de  $\mu \rightarrow$  même NG pour un même matériau (théoriquement)



$\mu$  identiques (Alu) mais épaisseurs différentes

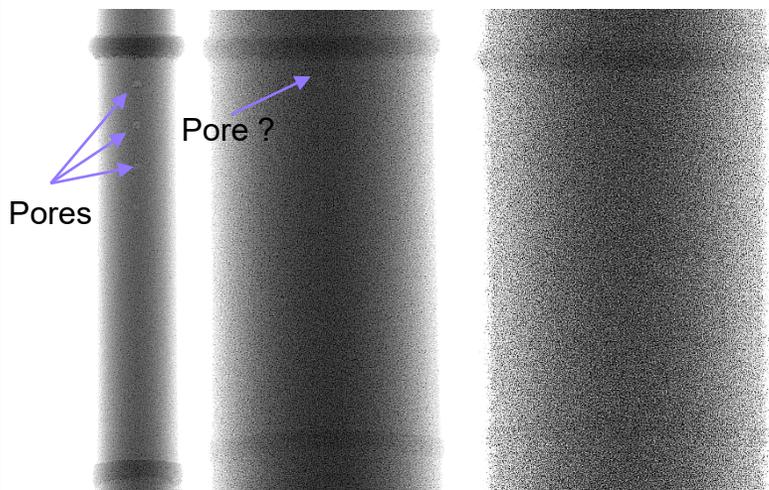
$\mu$  différents (Alu et Acier)



Radiographie X d'une pièce aluminium avec inserts aciers (RX SOLUTIONS)

# Effet de l'épaisseur cumulée sur la qualité d'images

### Eprouvettes Alliage 718



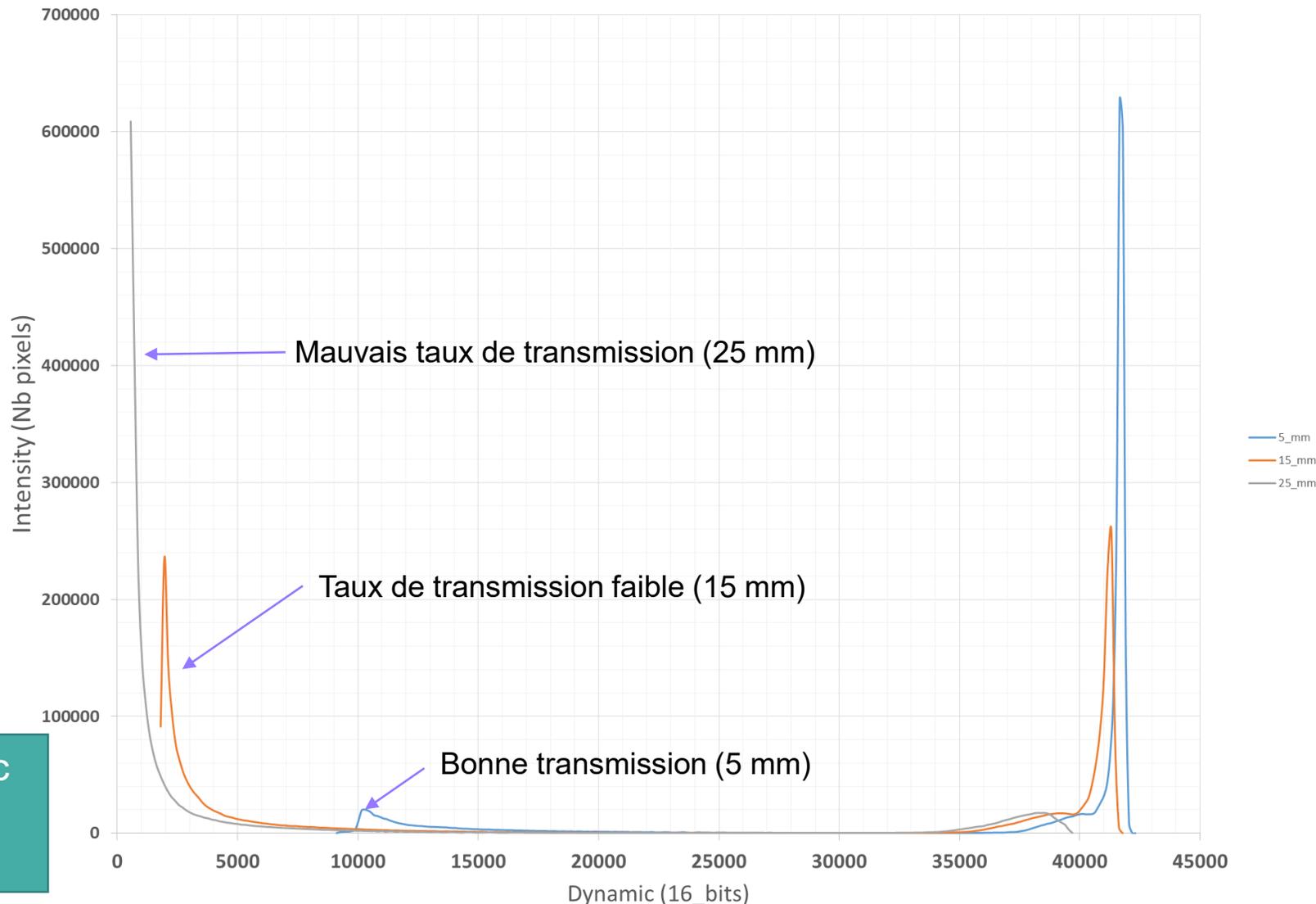
5 mm  
RSB: 3.50

15 mm  
RSB: 1.19

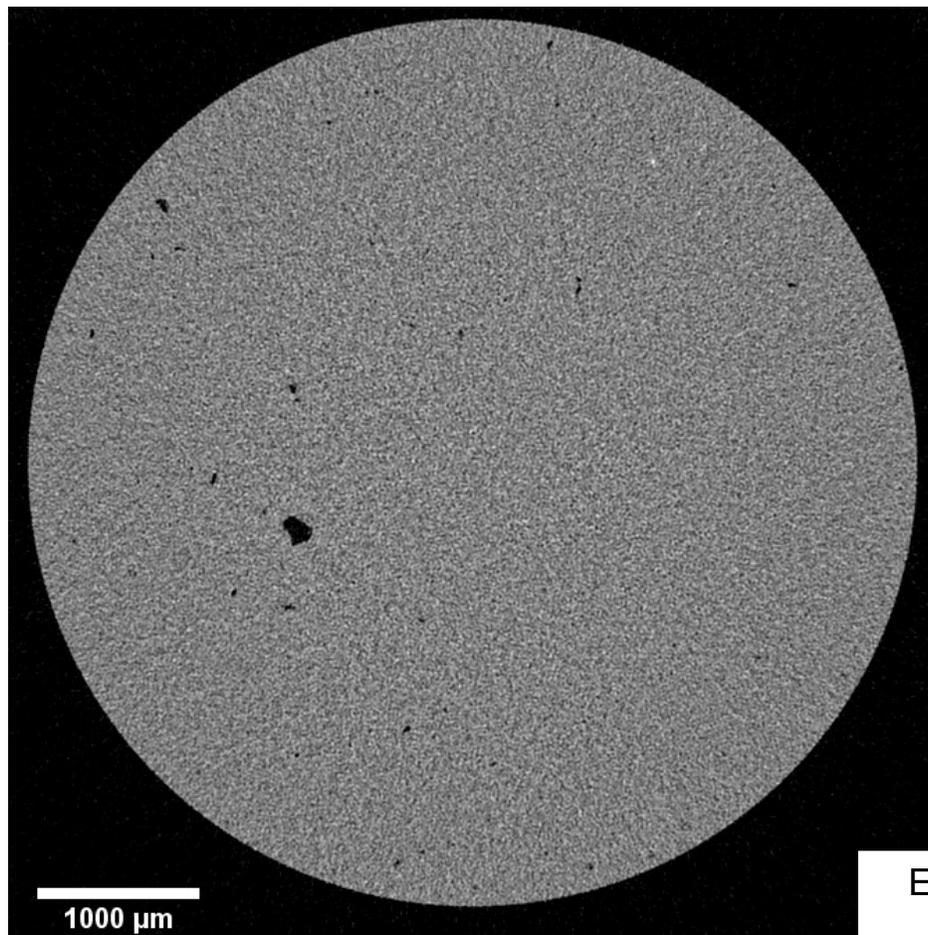
25 mm  
RSB: 0.55

Tension d'accélération : 230 kV  
Voxel size: 20  $\mu$ m

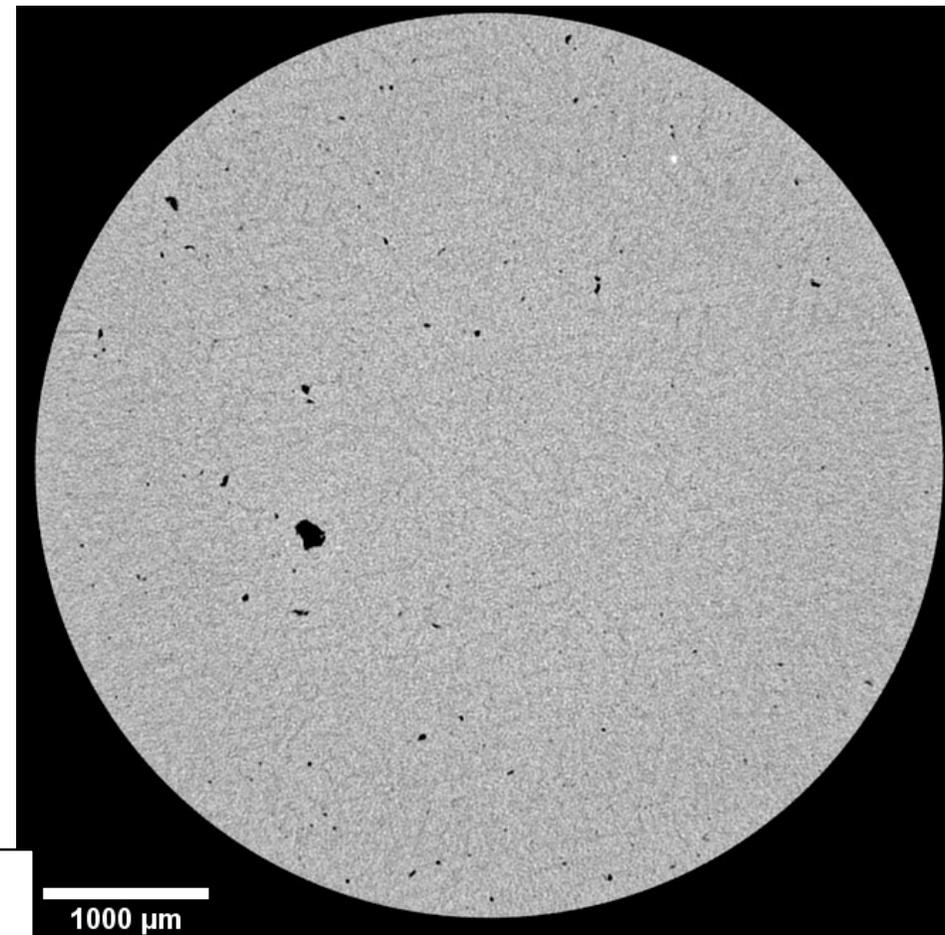
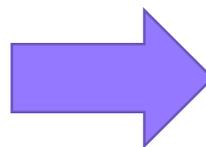
→ Le niveau de bruit augmente avec l'épaisseur  
→ La détection des pores diminue



# Influence du niveau bruit sur la détection des pores



Avec 1 projection radiographique  
Temps de scan : 10 minutes

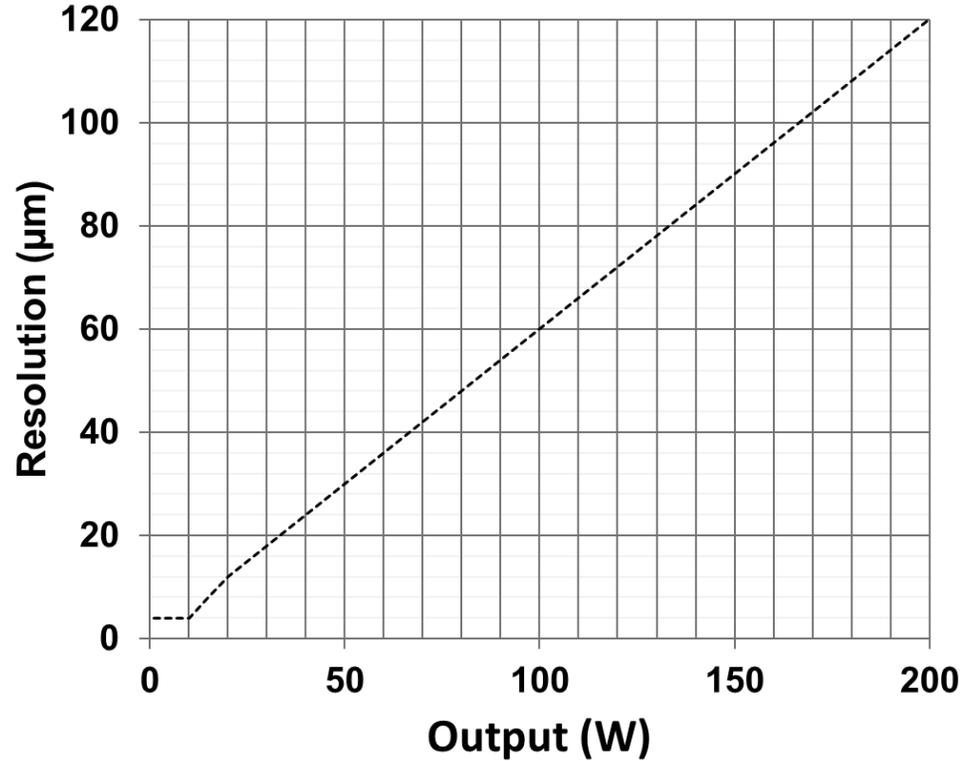


Moyenne de 10 images par projection radiographique  
Temps de scan : 31 minutes

Eprouvette AS7G06  
Tension 110 kV  
Taille de voxel : 8.50 μm  
704 projections

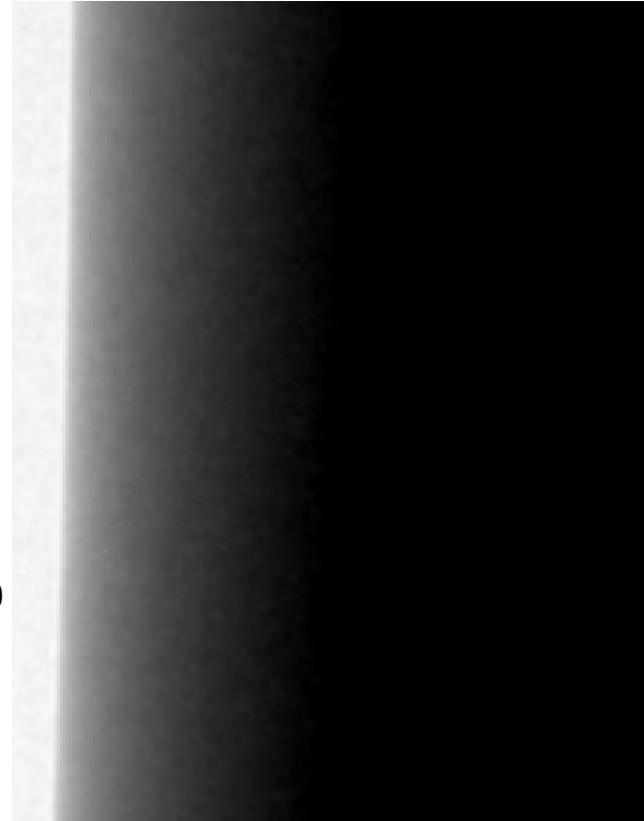
Réduction du bruit → meilleur détection des plus fines structures / contraste chimique dans l'alliage

# Résolution spatiale et taille de voxel

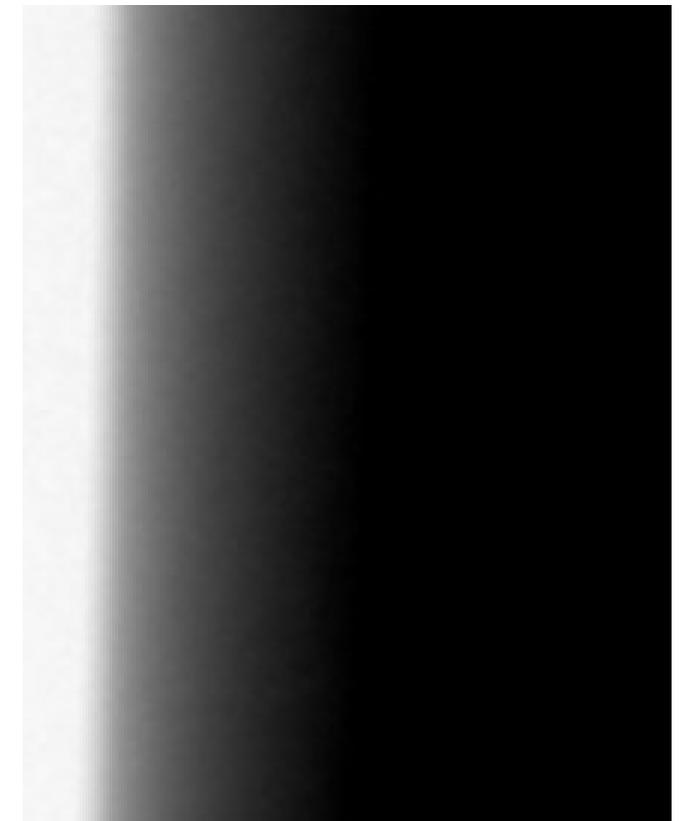


Résolution en fonction de la puissance du tube  
(Tube 230 kV – filament W)

Taille de voxel : 5,50 µm



Puissance: 5 W



Puissance: 20 W

Bord d'une éprouvette en aluminium



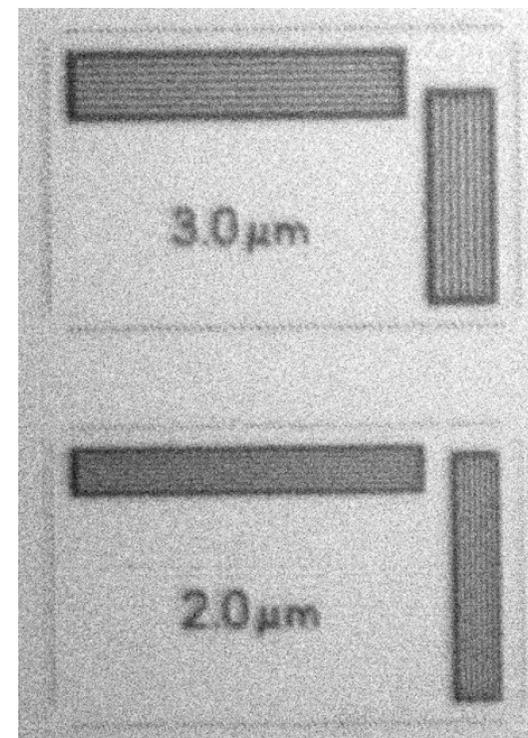
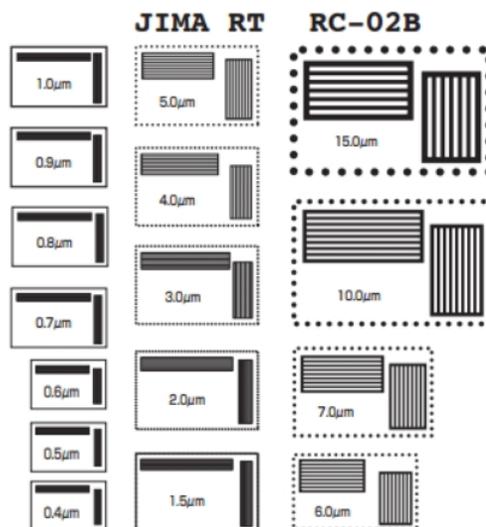
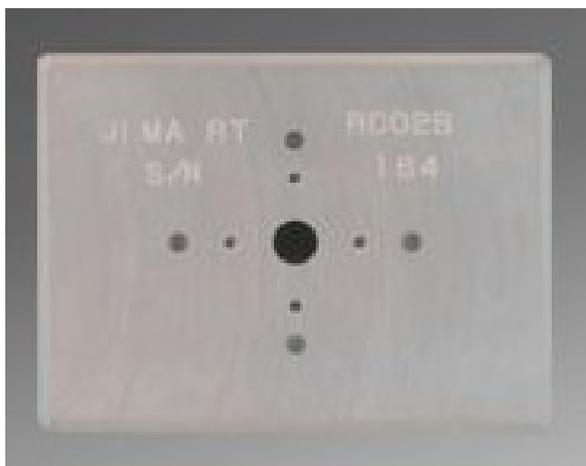
$$Voxel_{size} = Det_{psize} \times \frac{SOD}{SDD}$$

La taille de voxel est purement géométrique !

Le réglage de la netteté du tube à rayons X est essentiel pour une bonne détection

# Mesurer la résolution d'un système tomographique

- Outils de contrôle : la mire JIMA
  - Des patterns (lignes) en tungstène générés par photolithographie sont disposés horizontalement et verticalement sur un film de silice
  - Une radiographie est réalisée pour vérifier la résolution du tube. Si les lignes sont discernables, la résolution est correcte
  - Limite de résolution : de  $0,1 \mu\text{m}$  à  $10 \mu\text{m}$



Radiographie X – Mire JIMA



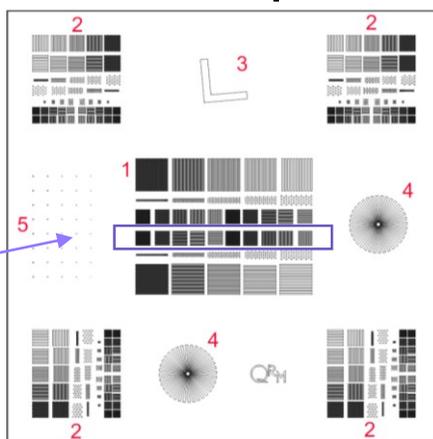
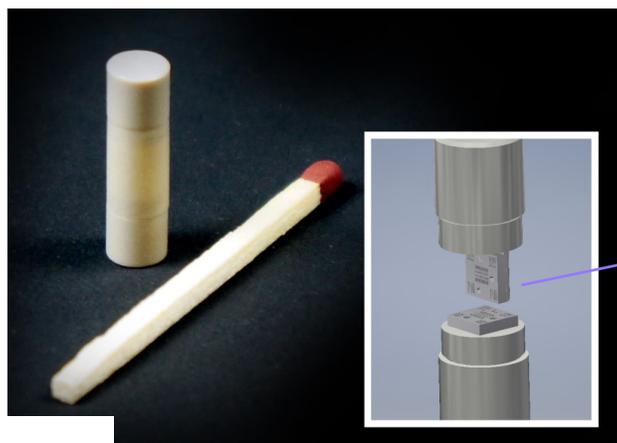
Vérification simple et ajustement en temps réel



Résolution 2D uniquement / contraste parfois faible

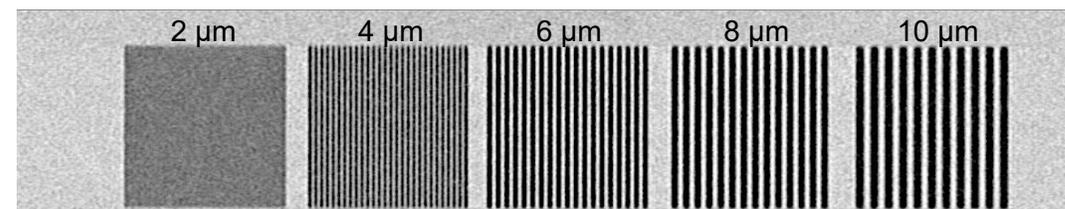
# Mesurer la résolution d'un système tomographique

- Outils de contrôle : la mire QRM
  - Des patterns 3D sont gravés sur deux supports en silicone disposés horizontalement et verticalement et enrobés dans un cylindre plastique
  - Une tomographie du cylindre est réalisée : si les lignes sont identifiables, la résolution spatiale en **reconstruction tomographique** est atteinte
  - Limite de résolution : de 1  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$

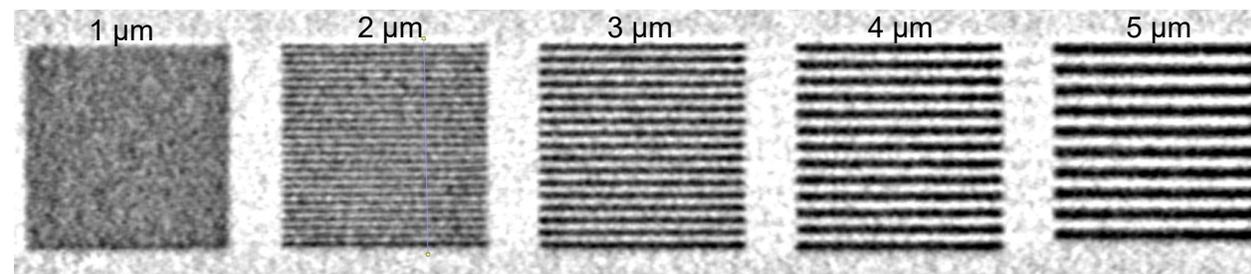


© QRM a PTW Company

QRM avec cathode W



QRM avec cathode LaB6



✓ Résolution 3D réelle

✗ Nécessite une acquisition tomographique > 1h  
Moins adapté à la haute énergie (faible contraste)

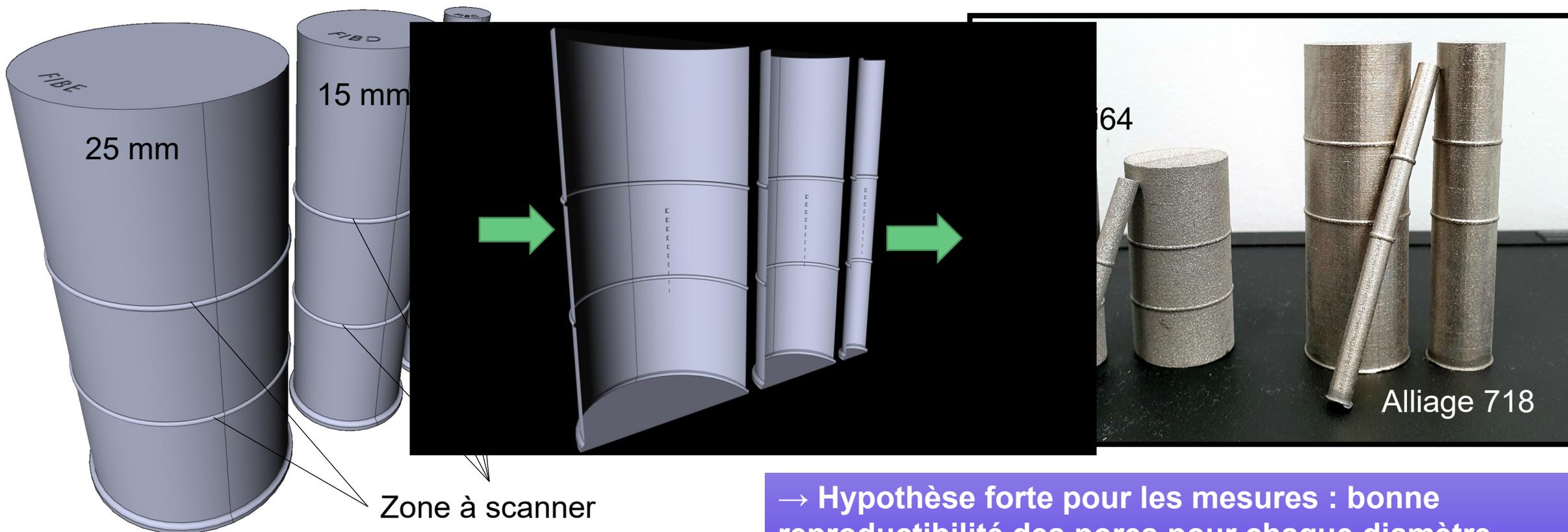
## En résumé

- ❑ Un bon réglage des éléments constituant la chaîne d'acquisition et de traitements ne garantit pas la détectabilité des défauts les plus fins
  
- ❑ Facteurs limitants :
  - Epaisseur cumulée trop importante → Signal transmis faible et niveau de bruit trop élevé
  - Densité du matériau trop forte → Mauvais contraste / artefacts d'images plus nombreux

# Mise en application

Eprouvettes Ti64 et Alliage 718 fabriquées par Laser Beam Melting (LBM)  
Création de 10 défauts artificiels cylindriques centrés pour préserver l'effet de l'épaisseur  
Diamètres de 500 à 50  $\mu\text{m}$

Model CAO



Zone à scanner

→ Hypothèse forte pour les mesures : bonne reproductibilité des pores pour chaque diamètre d'éprouvette

# Mise en application



Fixation des paramètres d'acquisitions tomographiques adaptés à la composition des échantillons, la géométrie et aux défauts recherchés

Matériaux	230 kV	300 kV	450 kV
Ti64	20 mm	25 mm	> 30 mm
Alliage 718	10 mm	15 mm	> 20 mm
IRT $\mu$ CT	✓	✗	✗

Valeurs théoriques

\*FS: Focal Spot

Taille de voxel de 20 $\mu$ m	Taille de voxel de 5 $\mu$ m
Scan global	Scan local (sauf diamètre 5 mm)
Tension maximale (230 kV)	Tension maximale (230 kV)
Power 20 W $\rightarrow$ 20 $\mu$ m *FS size	Power 6.9 W $\rightarrow$ 5 $\mu$ m *FS size
Seuil théorique de détection Deq= 0.050 mm	Seuil théorique de détection Deq= 0.012 mm
Même temps d'acquisitions	Temps d'acquisition selon la dynamique de l'image

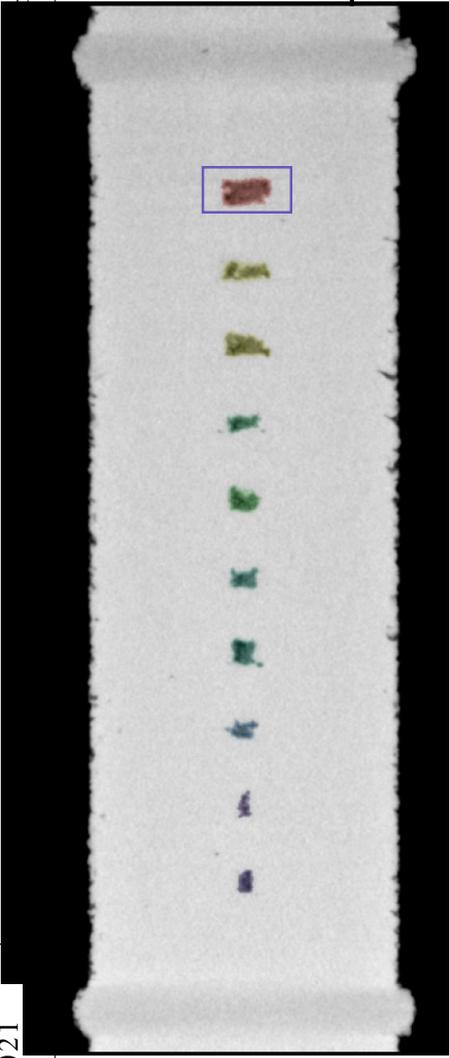


IRT  $\mu$ CT system (230 kV)

# Eprouvettes Ti64

5 mm / 20 μm

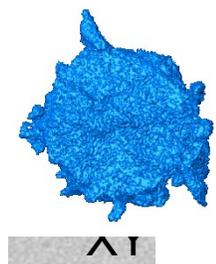
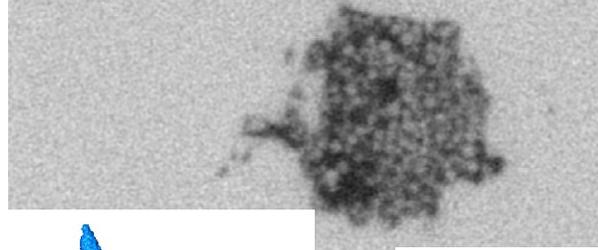
5 mm / 5 μm



	5 mm		15 mm		25 mm	
Résolution	20 μm	5 μm	20 μm	5 μm	20 μm	5 μm
Temps de scan	1h	3h30	1h	5h20	1h	7h30

5 mm / 5 μm  
XY

$D_{eq} = 0,592$   
 $D_{feret3D} = 1,024$



XY



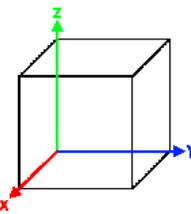
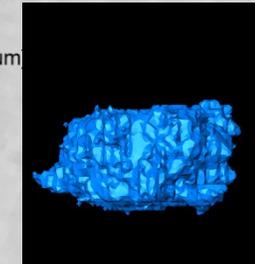
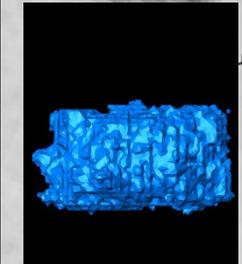
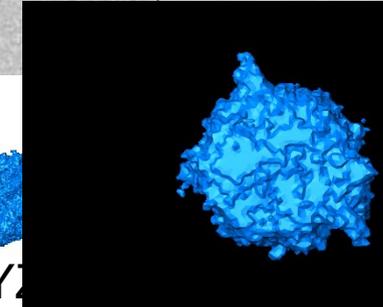
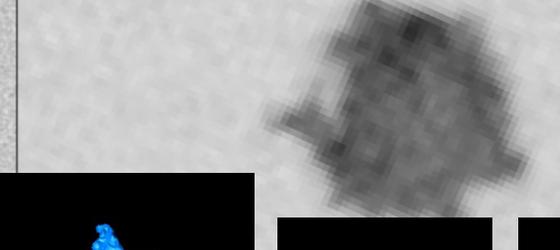
XZ



YZ

5 mm / 20 μm  
XY

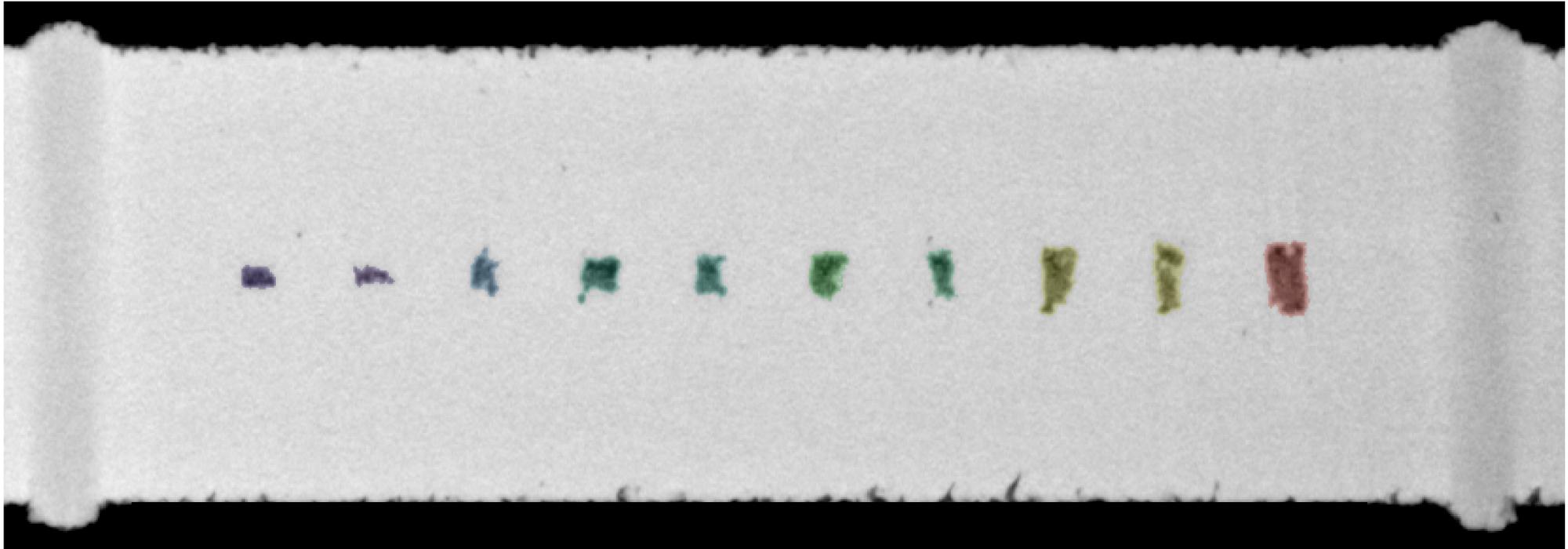
$D_{eq} = 0,685$   
 $D_{feret3D} = 1,032$



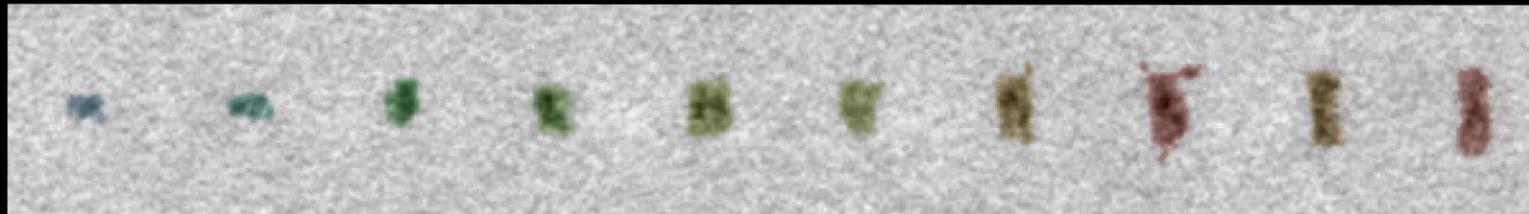
11/03/2021

# Eprouvettes Ti64

Diamètre 15 mm

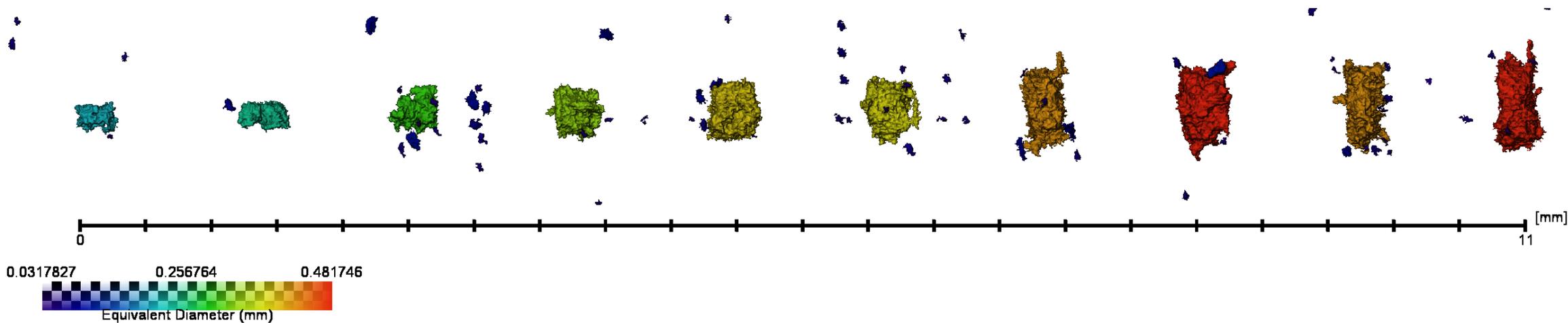
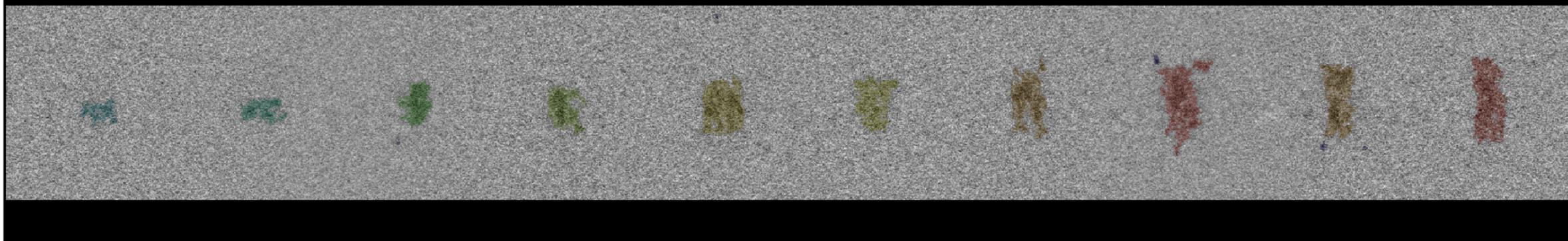


0.272539



Diamètre 25 mm

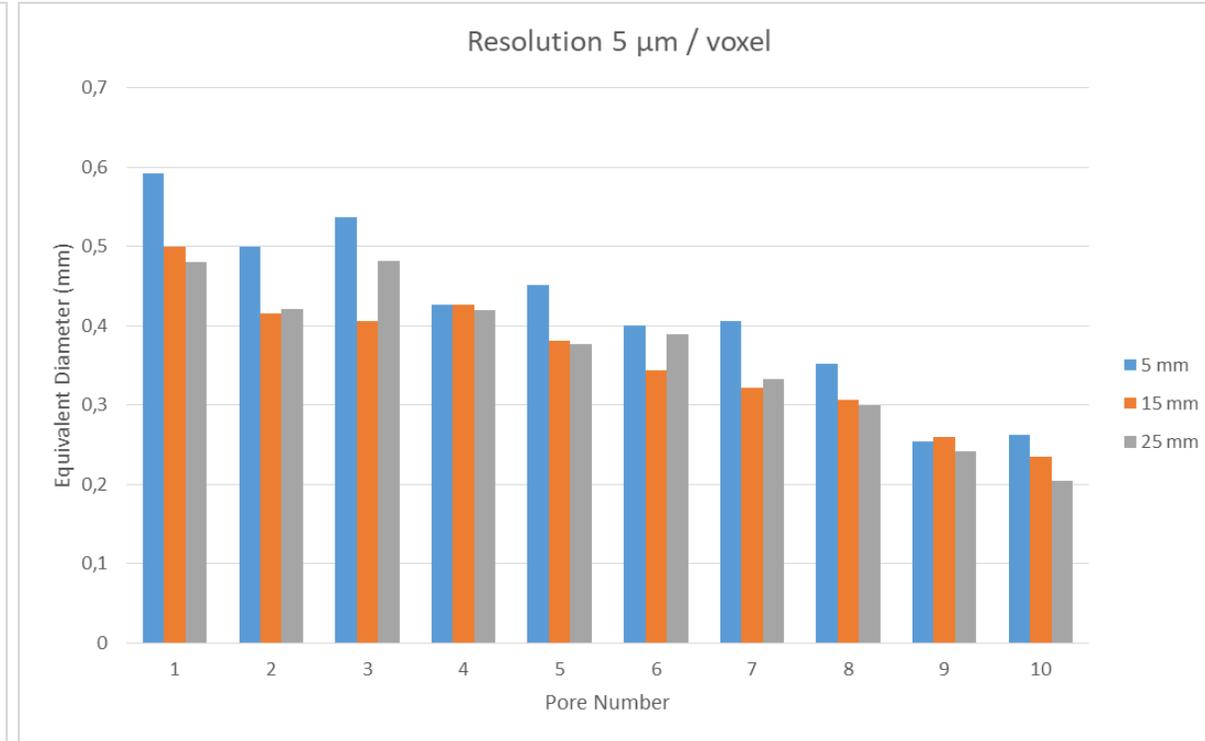
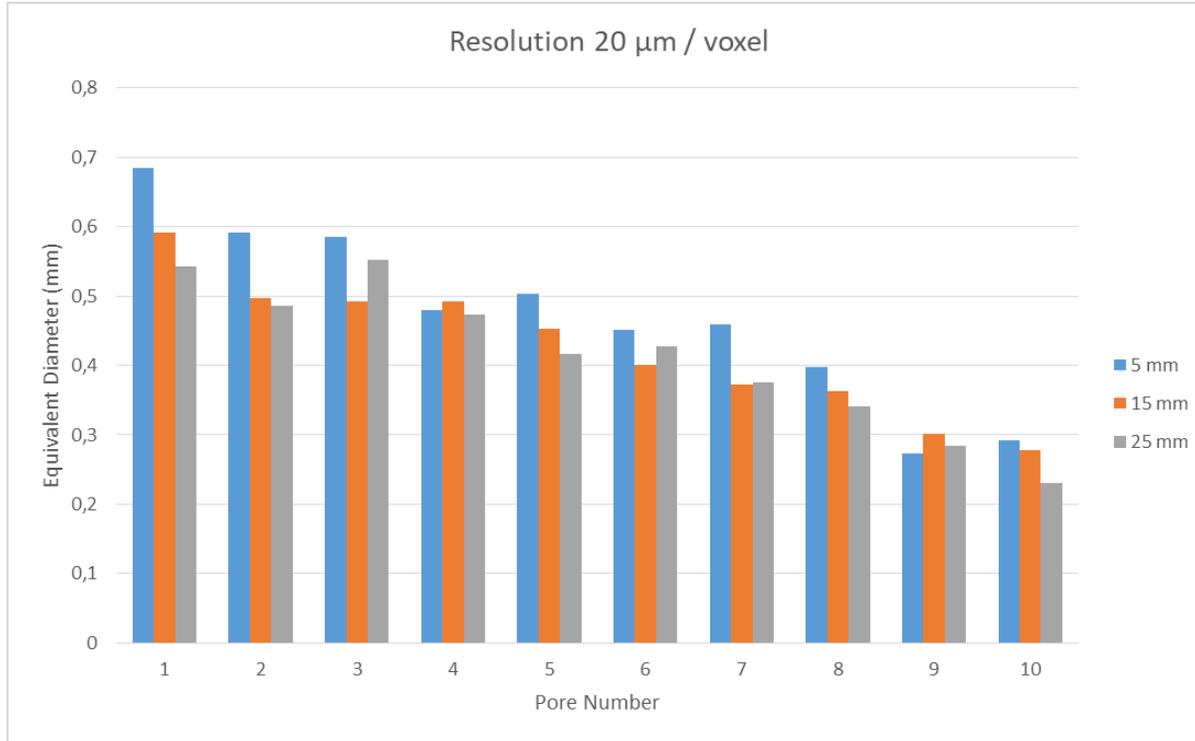




**Le bruit dans l'image devient très présent.  
La segmentation des pores est plus complexe mais la  
détection est encore précise.**

# Eprouvettes Ti64

## Effet de l'épaisseur sur la détection des défauts

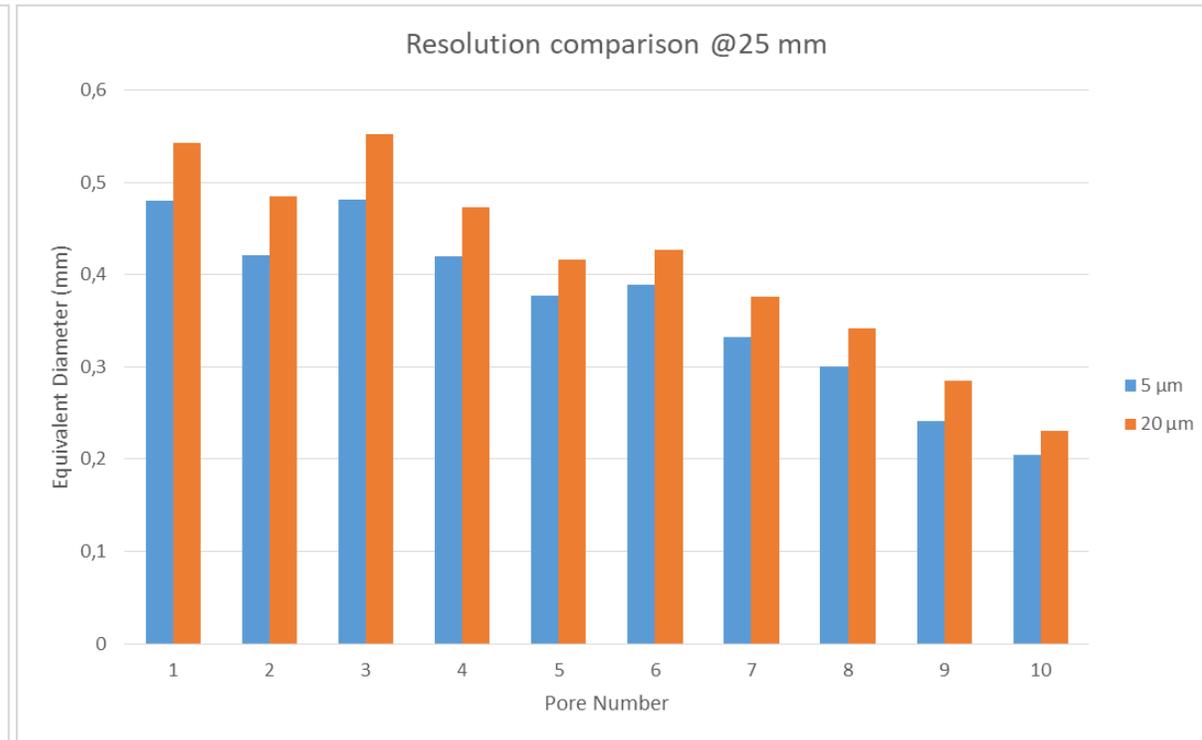
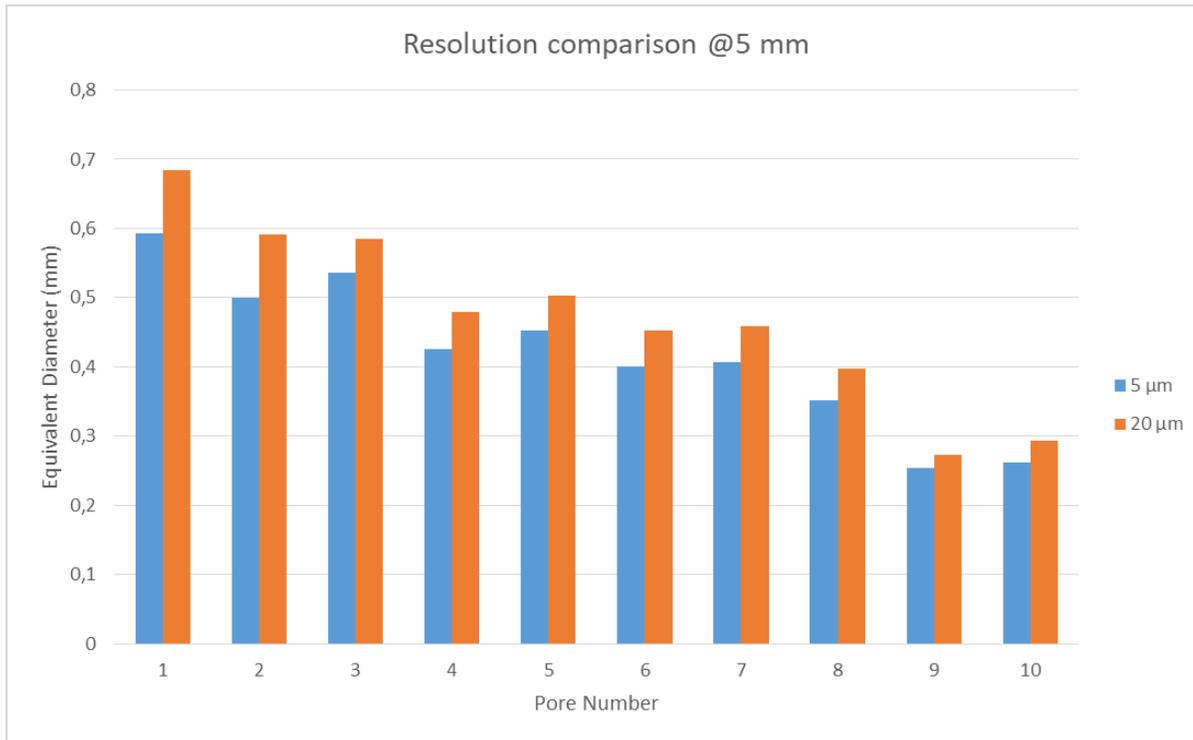


Les 10 pores sont détectés pour tous les diamètres.  
Les pores de plus de 200  $\mu\text{m}$  sont détectés pour l'épaisseur cumulée la plus grande (25 mm) à la plus faible résolution (20  $\mu\text{m}$ ).

# Eprouvettes Ti64

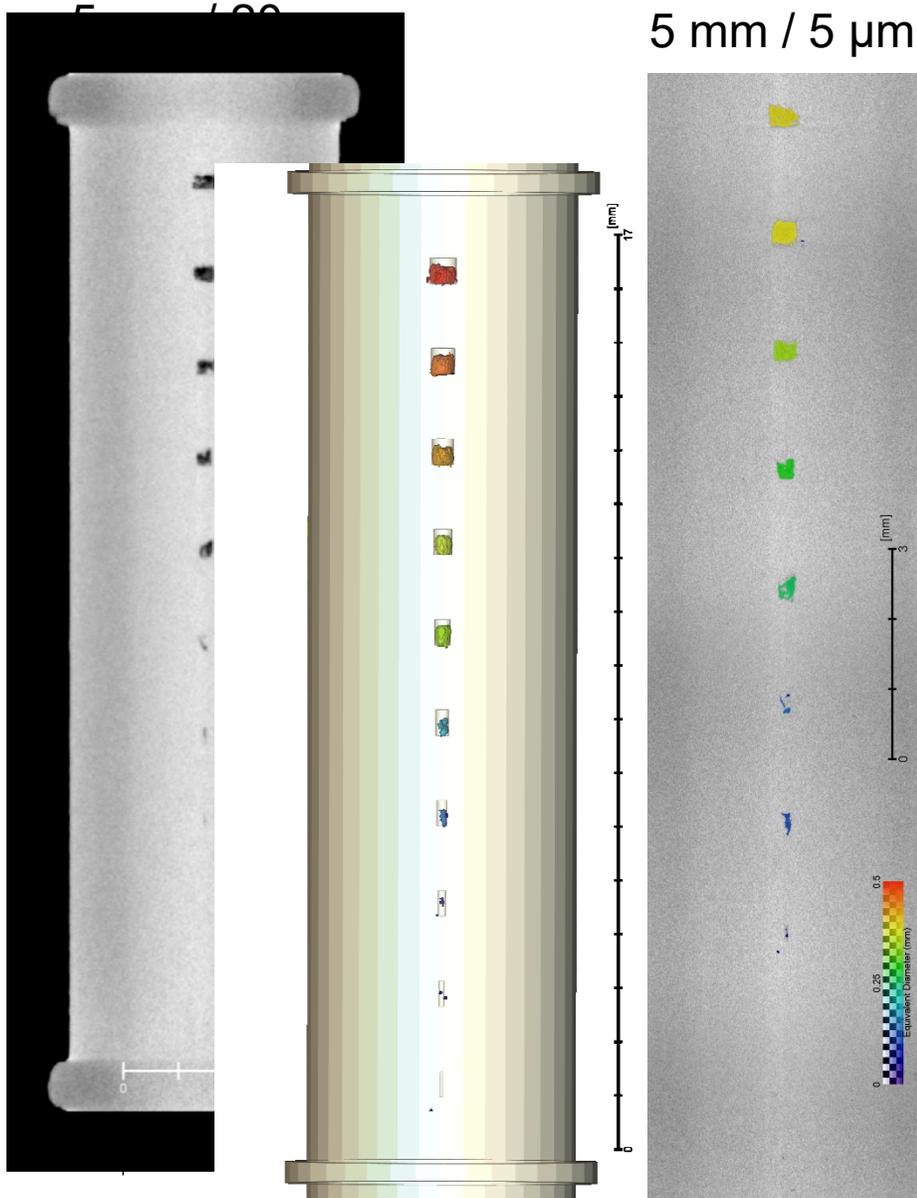
## Mesure des effets de la résolution sur la taille de pore

p  
a  
g  
e  
  
1  
8

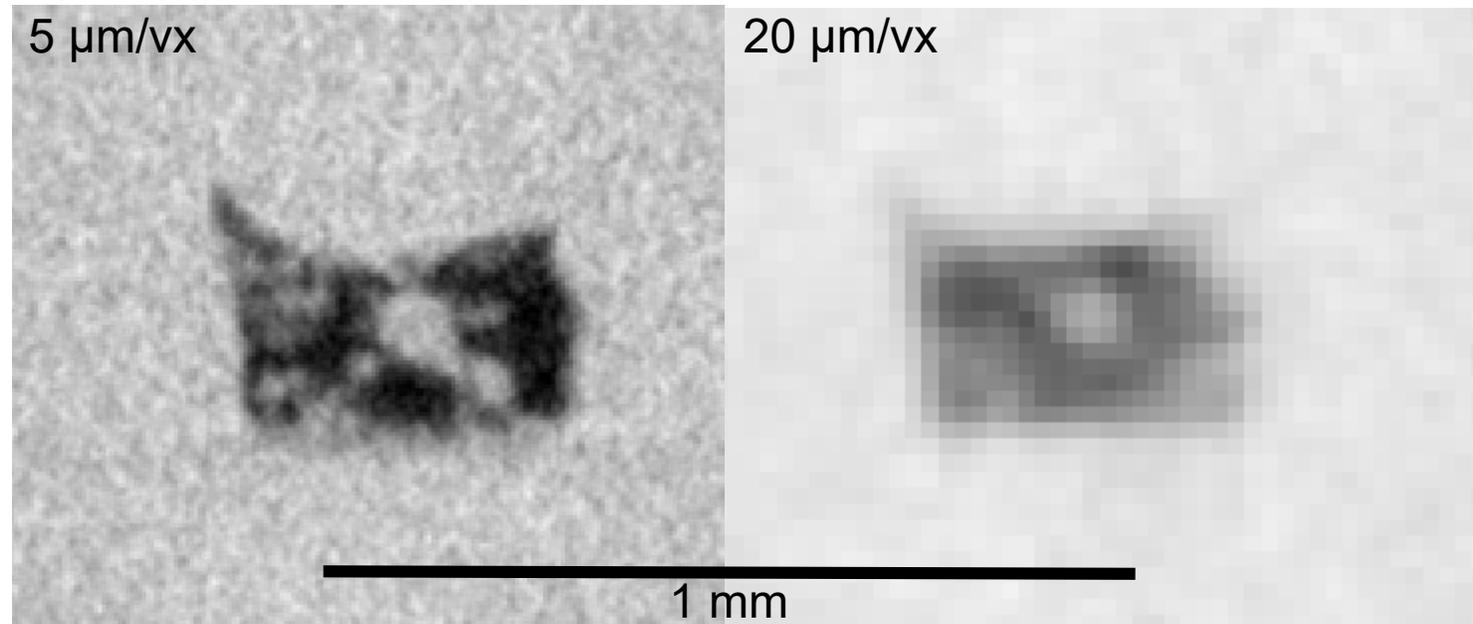


Les scans basse résolution ont tendance à la surestimation  
→ La haute résolution est utile pour une description très précise  
des géométries de défauts et à la détection des plus petits

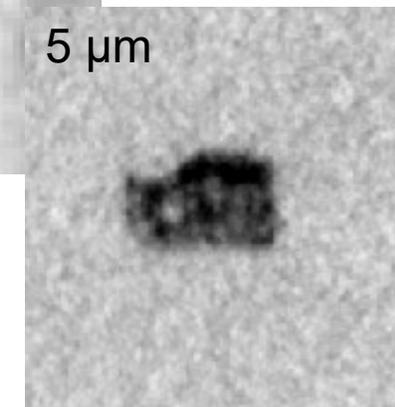
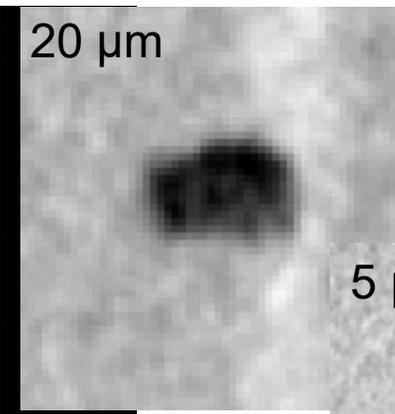
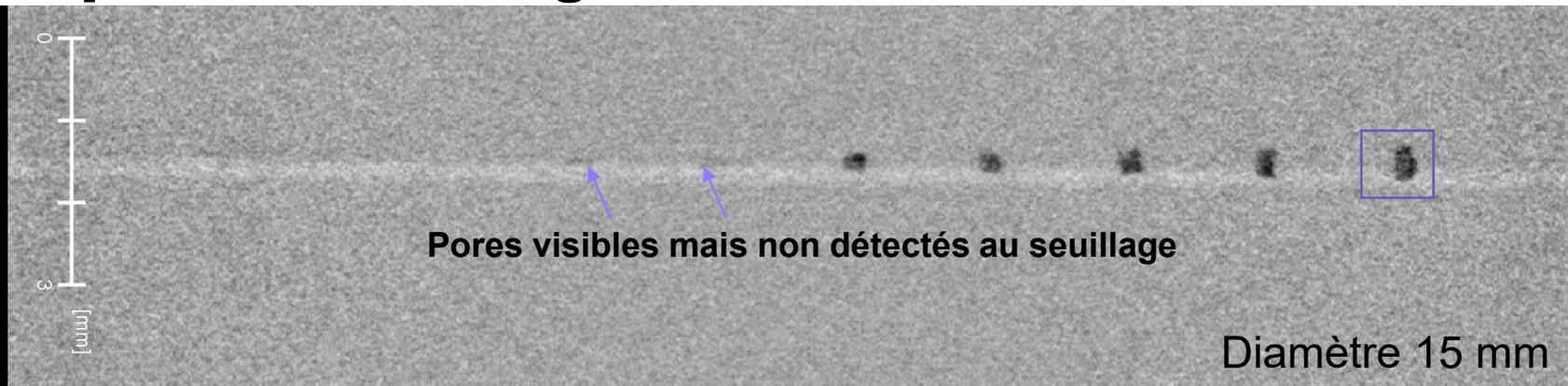
# Eprouvettes Alliage 718



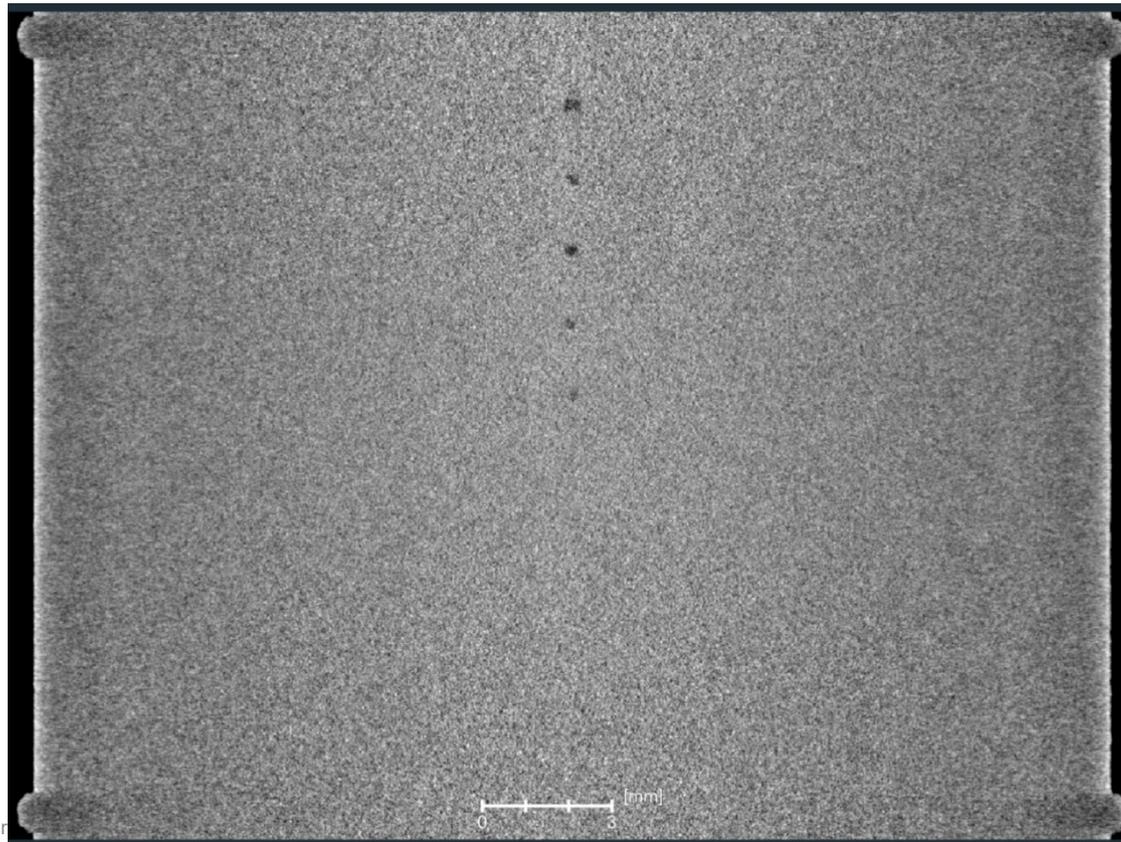
	5 mm		15 mm		25 mm	
Résolution	20 $\mu$ m	5 $\mu$ m	20 $\mu$ m	5 $\mu$ m	20 $\mu$ m	5 $\mu$ m
Temps de scan	1h	3h30	1h	12h30	1h	NA



# Eprouvettes Alliage 718

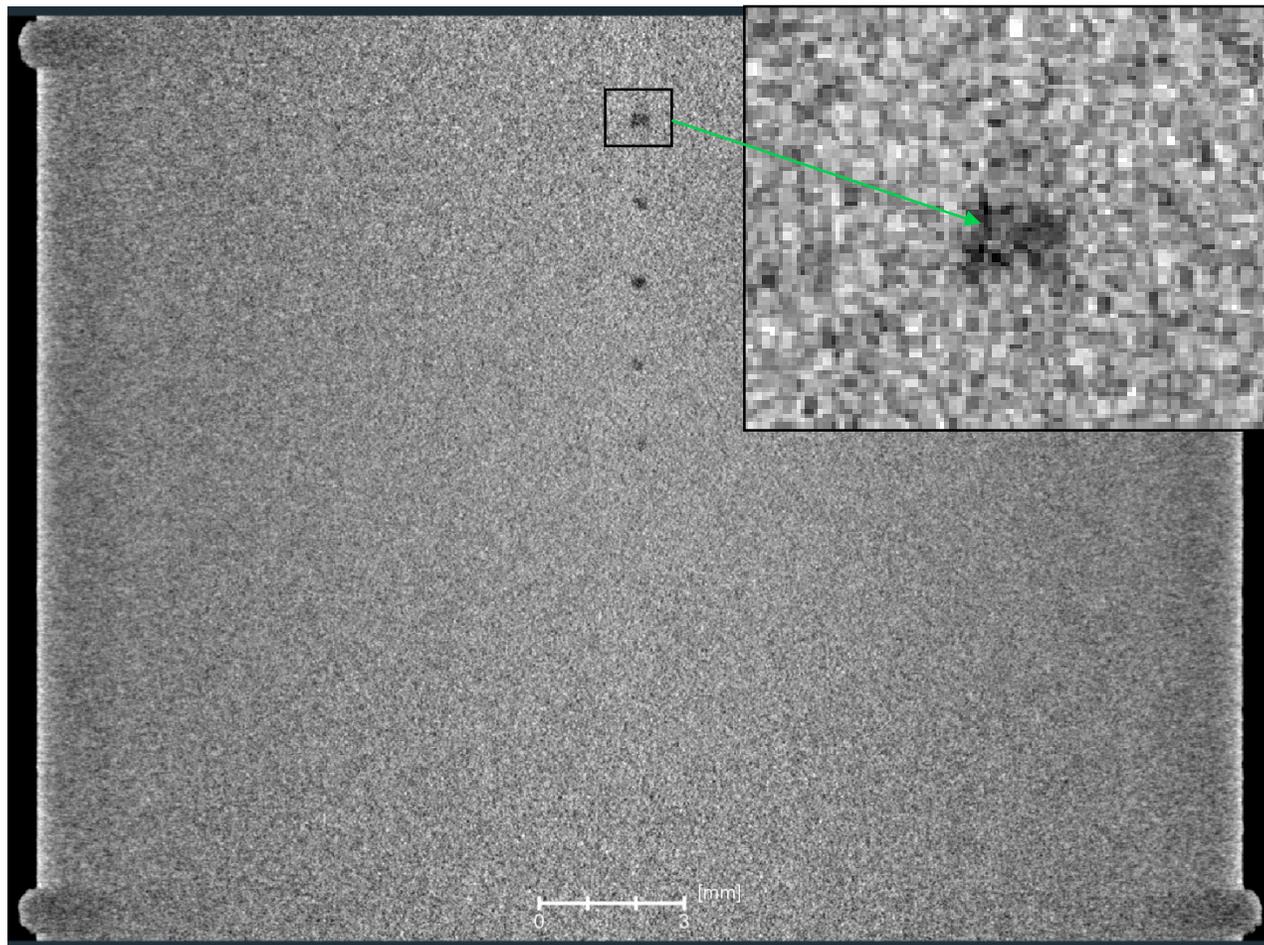


Taille de voxel : 20 μm



Diamètre 25 mm

# Eprouvettes Alliage 718



## Segmentation des défauts

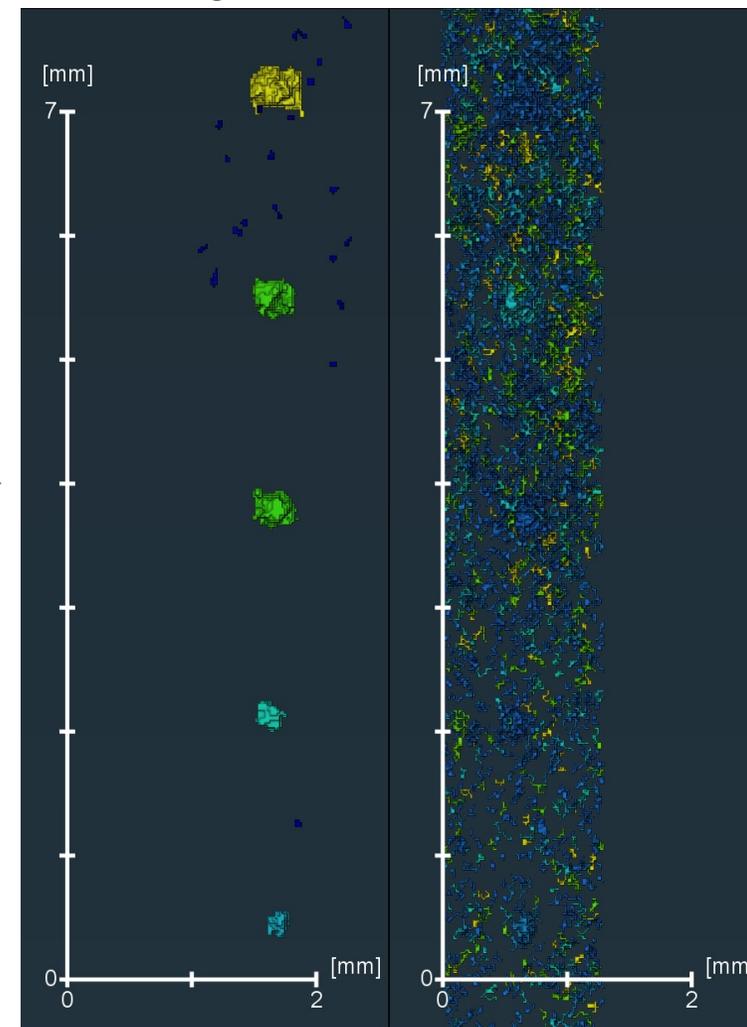


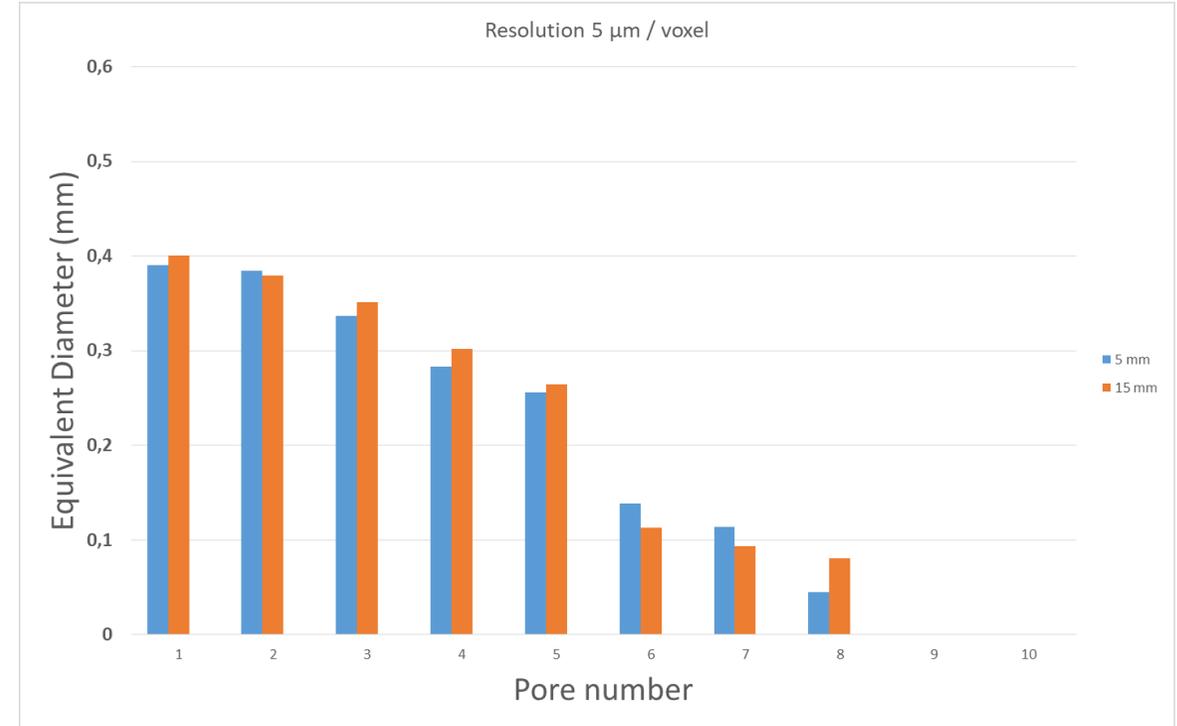
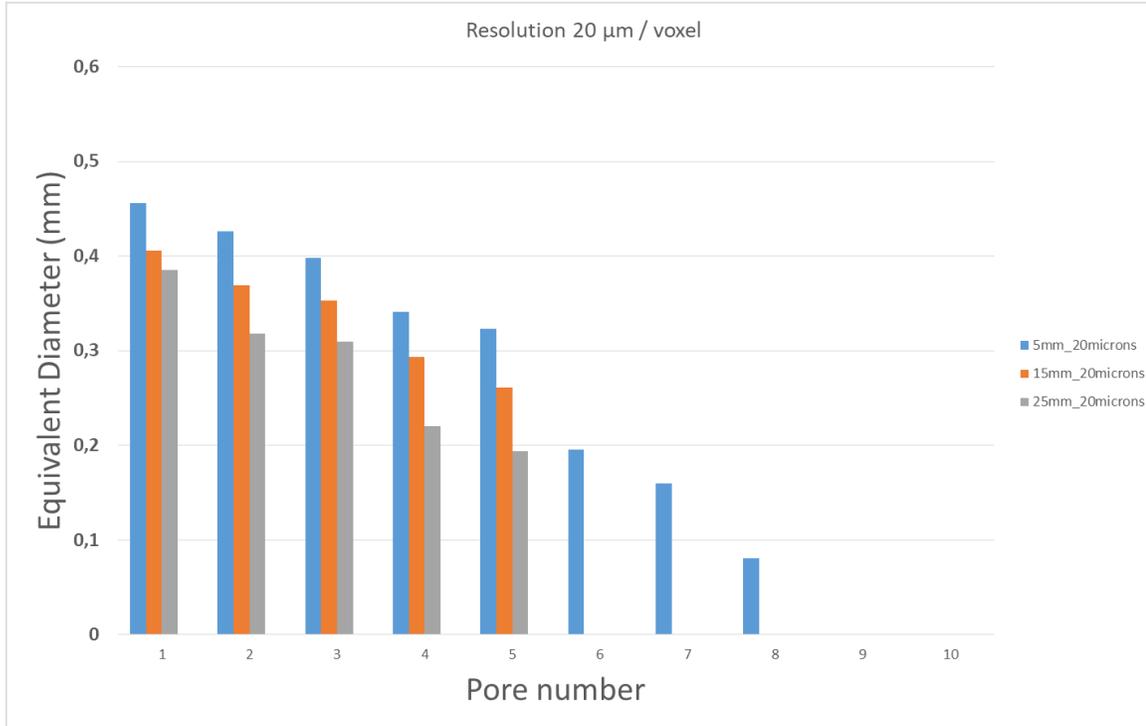
Image filtrée

Image brute

► Un post-traitement très poussé est nécessaire pour réduire le bruit et détecter les pores.  
La segmentation est très peu précise.

# Eprouvettes Alliage 718

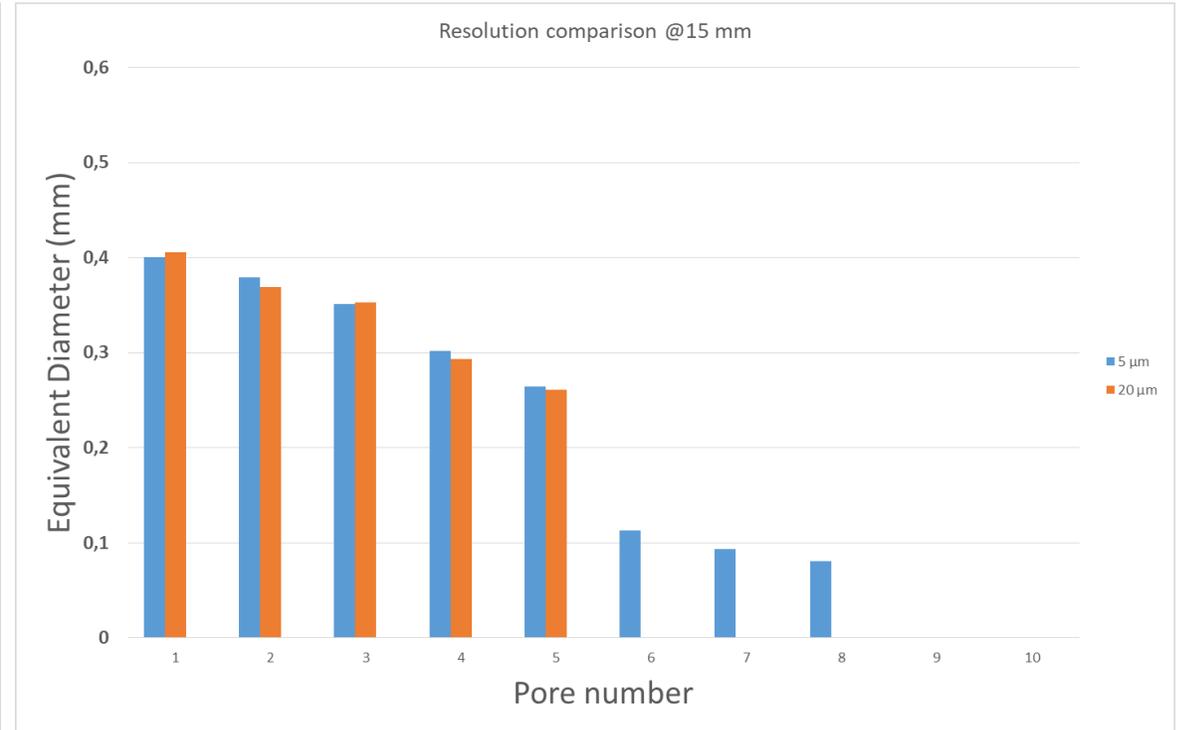
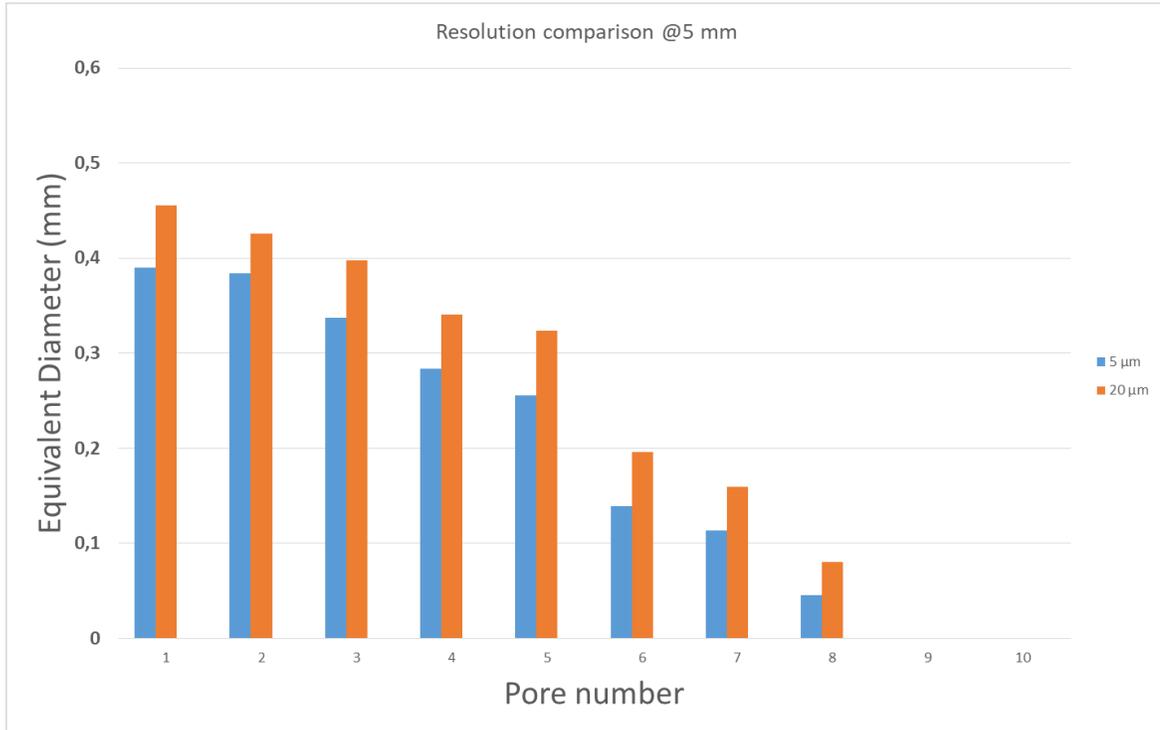
## Effet de l'épaisseur sur la détection des défauts



Les défauts construits dans l'alliage 718 sont plus petits que les défauts dans le Ti64.  
L'augmentation de l'épaisseur cumulée gêne la détection des pores  $< 200 \mu\text{m}$ .  
Les pores  $< 200 \mu\text{m}$  sont uniquement détectés avec la haute résolution.  
→ Doutes sur la construction des deux plus petits pores (9 et 10).

# Eprouvettes Alliage 718

## Mesure des effets de la résolution sur la taille de pore



Les scans basse résolution ont tendance à la surestimation  
La tendance se réduit en augmentant le diamètre (bruit de fond plus élevé, précision moins fiable)  
→ La haute résolution est utile pour les plus grandes épaisseurs cumulées mais n'est en pratique que peu applicable

# Conclusions

- La tomographie X haut énergie (230 kV) offre une bonne détection des défauts dans des alliages métalliques communs.

## Ti64 :

- Bonne détection possible à haute et basse résolution pour les épaisseurs jusqu'à 25 mm
- Les temps de scans sont raisonnables pour un seuil de détection théorique  $> 50 \mu\text{m}$

## Alliage 718 :

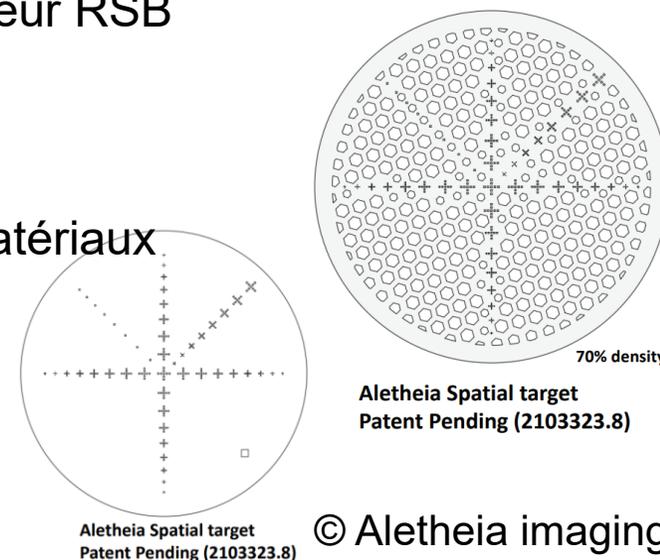
- Détection complexe dès 15 mm d'épaisseur cumulée voir impossible au-delà de 25 mm
- Haute résolution nécessaire pour les pores  $< 200 \mu\text{m}$
- Temps de scans importants  $\rightarrow$  incompatible avec des besoins de scans récurrents

- Différences de détection entre les deux alliages nettes malgré des paramètres similaires
  - Influence forte de la nature du matériau sur la détection des défauts
  - Améliorations possibles par l'utilisation de tubes 300 kV et plus capables de travailler à des résolutions élevées (préservation d'un point focal petit)  $\rightarrow$  meilleur pénétration et meilleur RSB

## Pour aller plus loin?



- Influence de la morphologie des défauts (défauts plans, fissures...)?
- Développement d'outils 3D « calibrés » pour différentes familles de matériaux en tenant compte des incertitudes liées à la mesure tomographique
- Mesures des performances (détection) et suivi machine





**Merci de votre attention !**