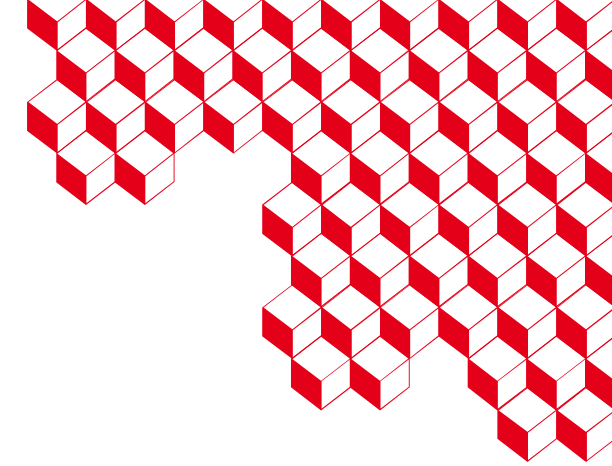




Développements récents en tomographie RX robotisée sur pièces métalliques

Pierre DÉRIAN, CEA Pays de la Loire

PRECEND Journée technique CND 4.0
03/07/2025, JVMA, Bouguenais



precend
Le réseau des compétences en CND & SHM



Sommaire

CEA Pays de la Loire et son équipe-plateforme **SEANERGY**

Décarbonation du transport maritime à travers les Nouveaux Systèmes énergétiques

→ **durabilité** en environnement difficile

→ **mise à l'échelle multi-MW** pour des application marines

1. Contribuer à la préservation du Patrimoine

Inspection tomo-RX d'un Mantelet de sabord de 1692

2. Accélérer la mise au point des procédés

Prédiction du comportement en fatigue à partir d'algorithmes génératifs



1. Inspection tomo-RX d'un mantelet de sabord de 1692

B. ROMAN, P. DÉRIAN
CEA Pays de la Loire, Bouguenais



Contexte & description de l'objet

Mantelet de sabord d'une épave du XVIIe
Musée de l'île Tatihou (Cotentin)

Dégradation : comparatif 1993/2023

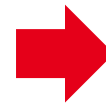


Avec une **penture en fer** et un **anneau** visible, plusieurs gangues.

Dans une **boite en bois** avec mousses de maintien en position des gangues.

Objectifs Arc'Antique :

Stabiliser le bois et le métal, **retrouver la géométrie** originale de la penture et des anneaux métalliques contenus dans les gangues marines.

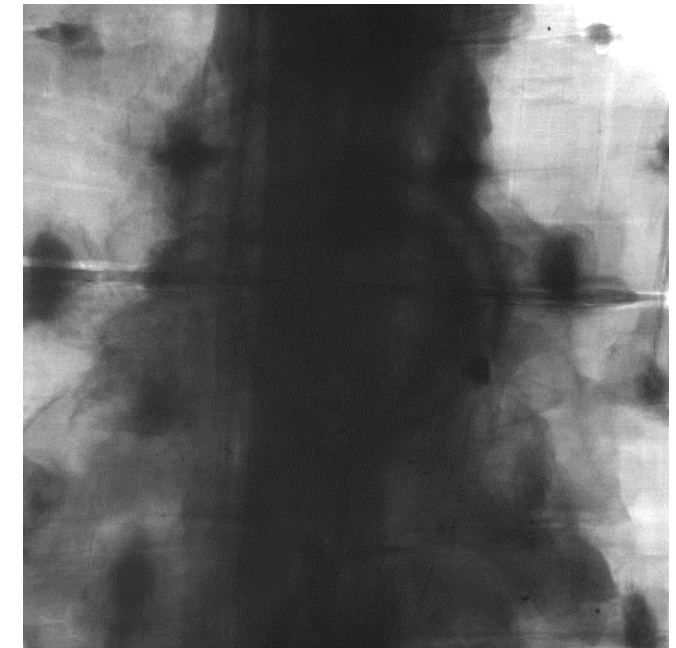
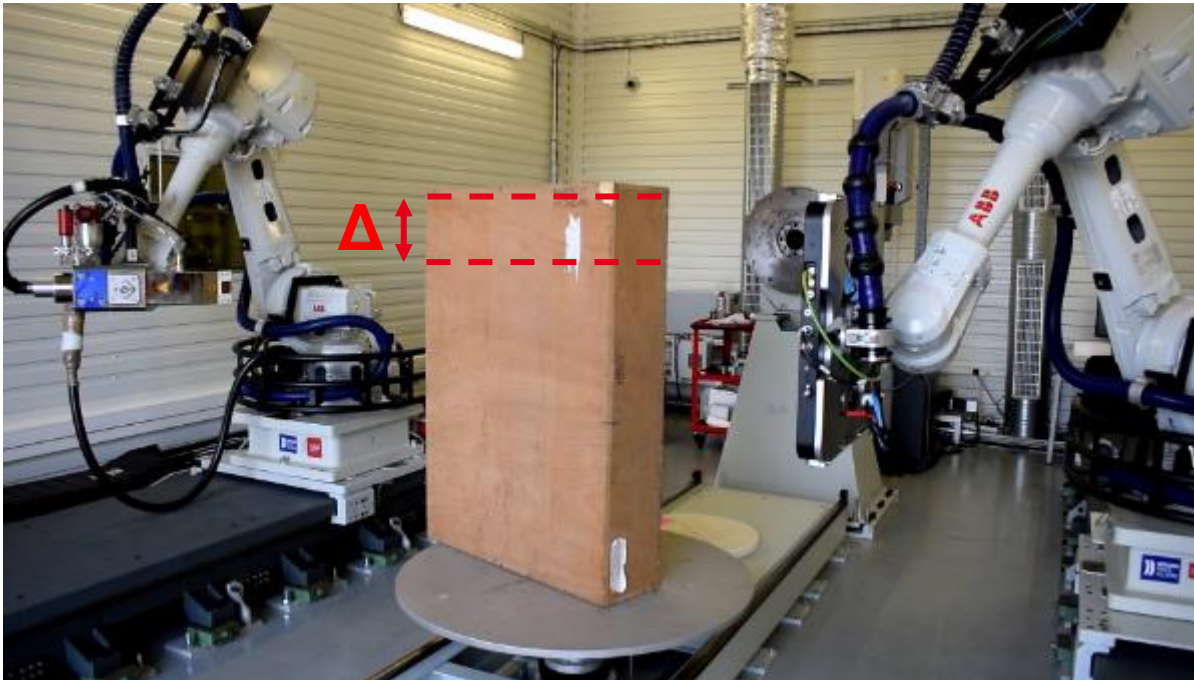


Proposition CEA :

Tomographie par rayons X, **segmentation** des zones d'intérêts (penture et anneaux) pour permettre l'**impression 3D** des volumes.

Acquisition

- Avec la **cellule RX robotisée** du CEA Pays de la Loire
- Objet contenu dans une **boite en bois** de faible épaisseur, facilement traversable par les rayons X.
- Hauteur importante → **6 volumes**, $\Delta=200$ mm

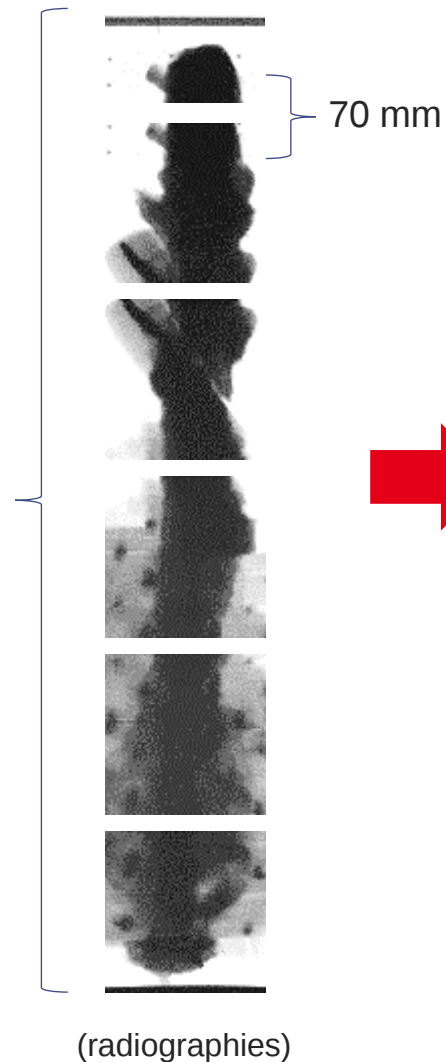


Résolution : 130 μ m

Méthode de **reconstruction 3D**

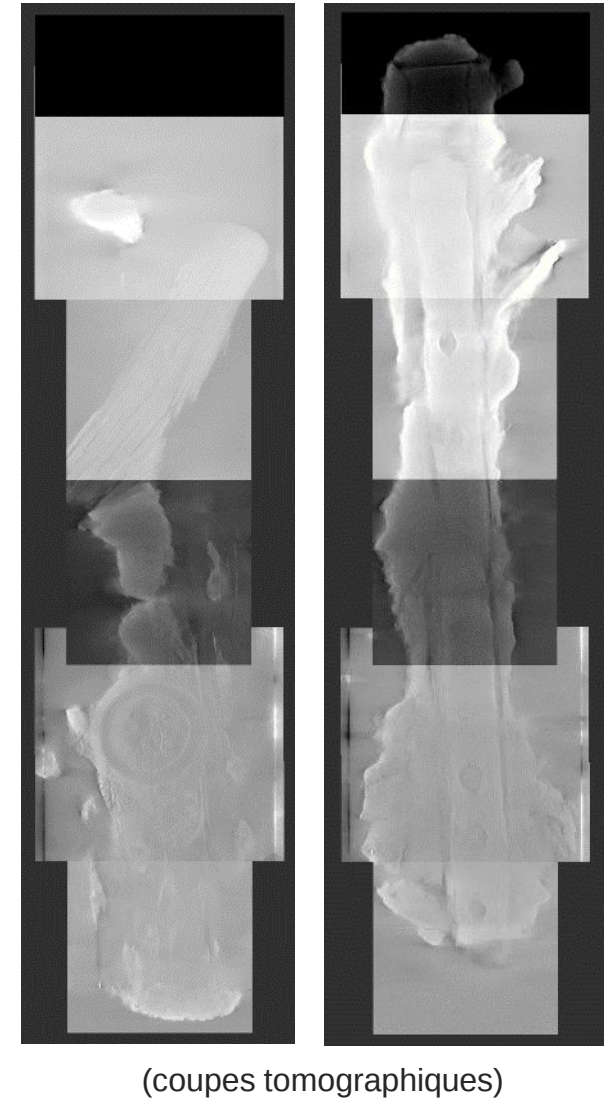
Radiographies des 6 hauteurs
avec zone de recouvrement
de 70 mm.

(1440 projections par hauteur)



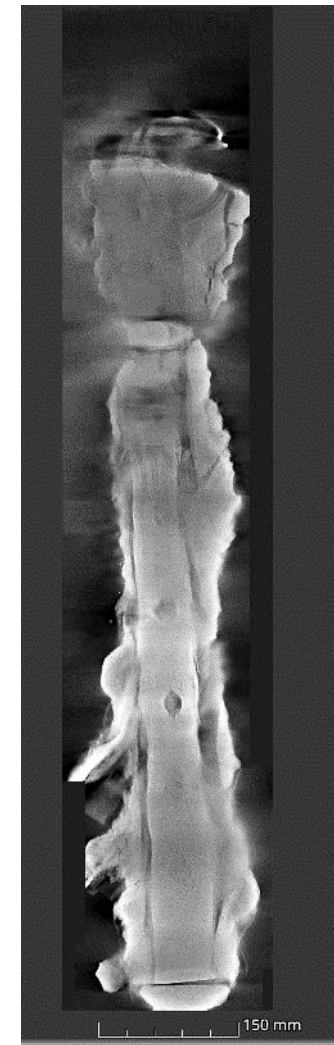
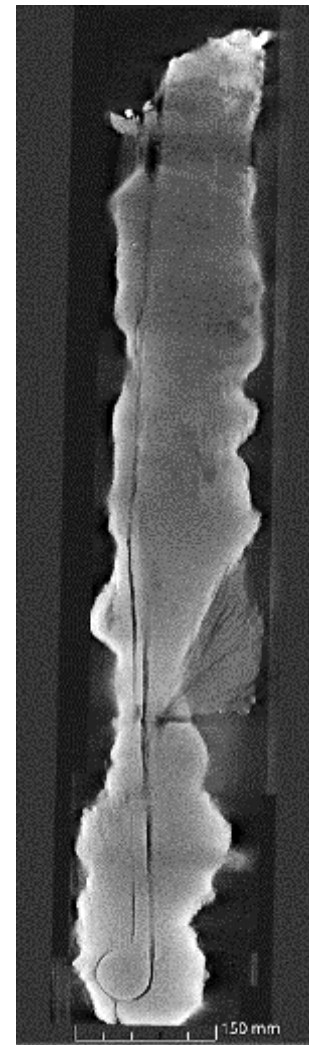
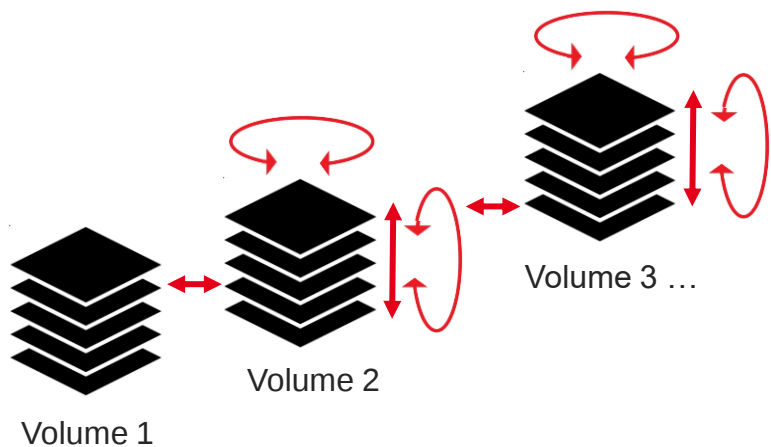
Reconstruction d'un volume
3D pour chaque hauteur puis
alignement des volumes.

Problème de discontinuité
des niveaux de gris (due aux
différences de densité des
matériaux, vis de la boîte ...).



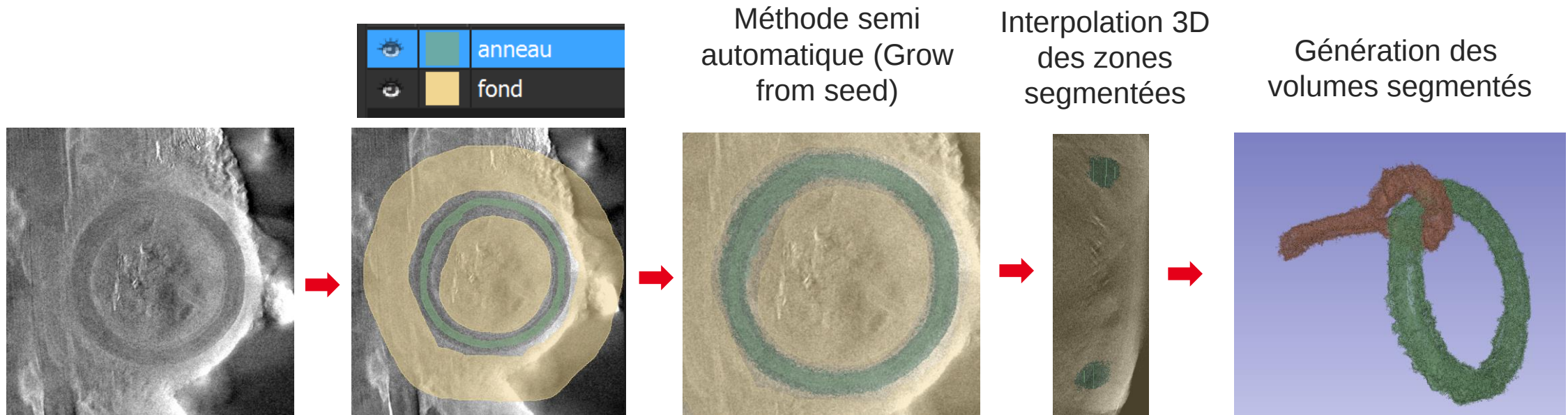
Assemblage des volumes

Homogénéisation du contraste et **alignement automatique des volumes** pour améliorer la qualité des reconstructions

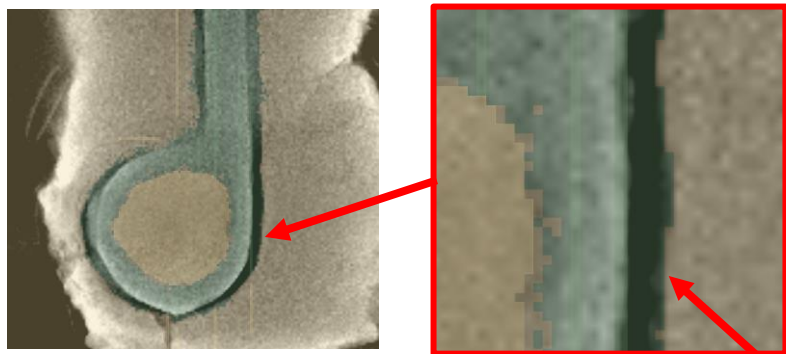


(coupes tomographiques)

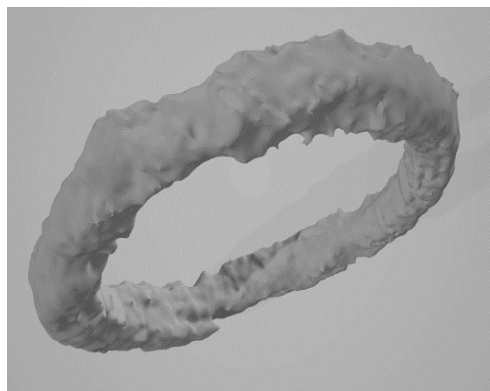
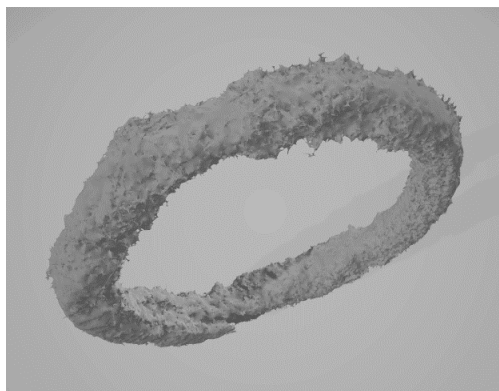
Segmentation semi-automatique



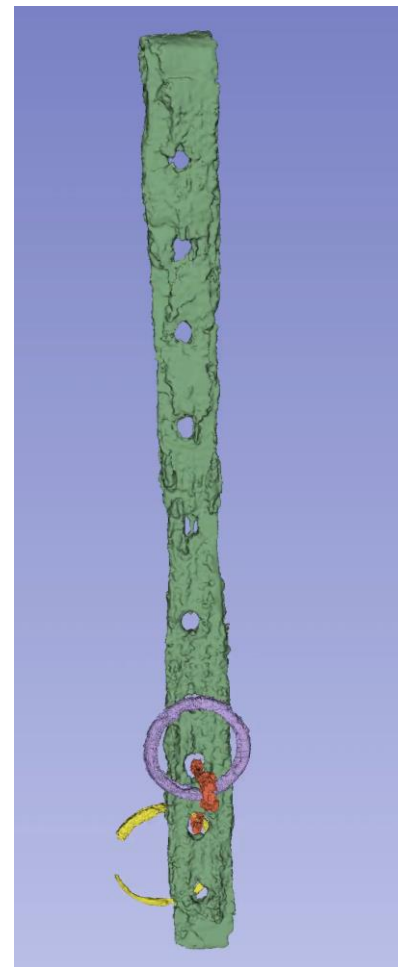
Restitution des **résultats**



Prise en compte de la forme intérieure de la **gangue** et du **vide** créé par la dissolution du fer.



Filtre *smooth* pour **adoucir la surface** des volumes



Impression de la pièce



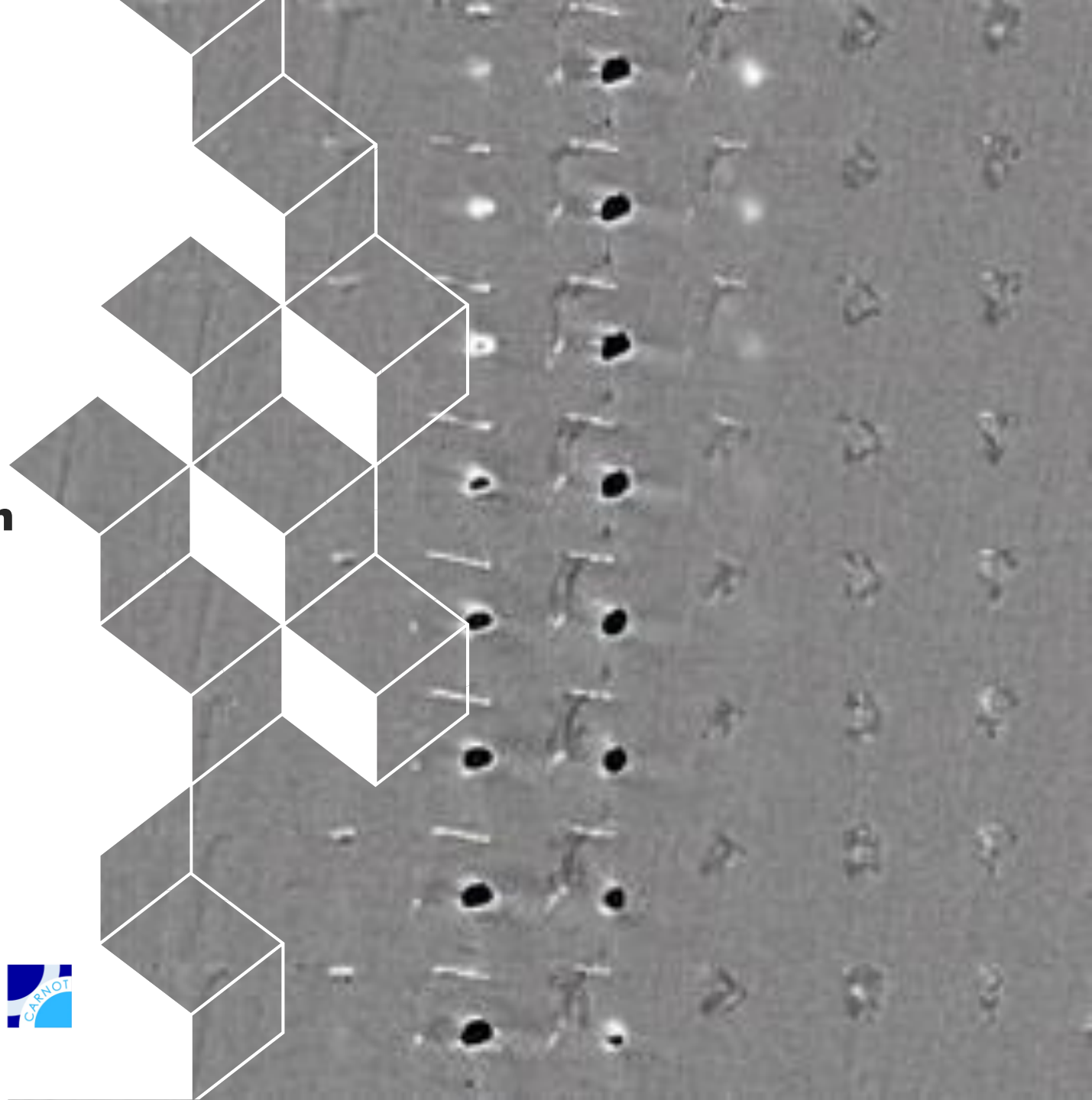
2. Prédiction du comportement en fatigue à grand nombre de cycles de matériaux à défauts à partir d'algorithmes génératifs

L. DOLLÉ¹, P. MÉROT², F. MOREL², T. LANDRON³

¹CEA Pays de la Loire, Bouguenais

²LAMPA, Arts et Métiers, Angers

³CETIM, Nantes



Contexte

- **Objectif** : réduire le nombre d'itérations et les coûts de développement.



- **Méthode proposée** :

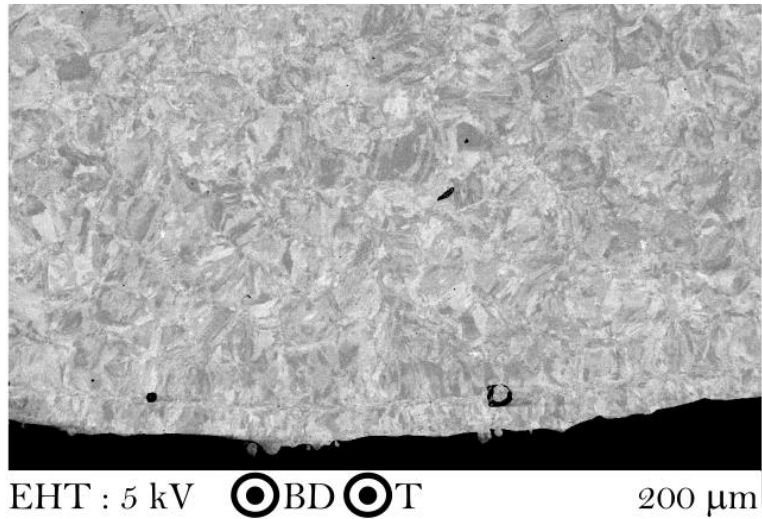
Utilisation d'algorithmes génératifs (GANs, modèles de diffusion) pour générer des images de tomographies réalistes.

- **Projet exploratoire** pour évaluer la faisabilité des **méthodes de diffusion** pour la **génération de défauts**
 - Utilisation de méthodes existantes (pas ou peu de *finetuning*)
 - Evaluation principalement qualitative
 - Identifier des pistes d'approfondissement

Deux matériaux

316L issu de Fusion Laser sur Lit de Poudre

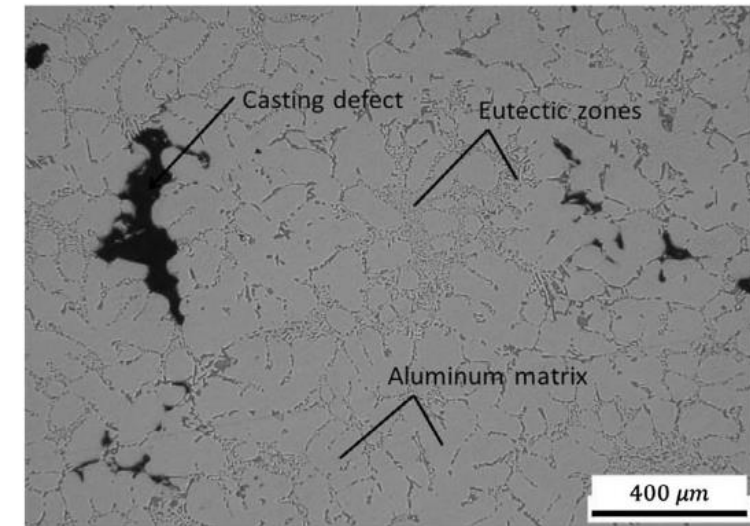
Acier inoxydable austénitique



M. Auffray, « Effet de l'état de surface, des défauts, des contraintes résiduelles et de la microstructure sur la tenue en fatigue de l'acier inoxydable 316L fabriqué additivement par Fusion Laser sur Lit de Poudre », PhD Thesis, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, 2025.

AlSi7Mg0.3 issu de fonderie (lost foam)

Alliage d'aluminium coulé



V.-D. Le, N. Saintier, F. Morel, D. Bellett, et P. Osmond, « Investigation of the effect of porosity on the high cycle fatigue behaviour of cast Al-Si alloy by X-ray micro-tomography », International Journal of Fatigue, vol. 106, p. 24-37, 2018.

Données issues de **tomographies X**

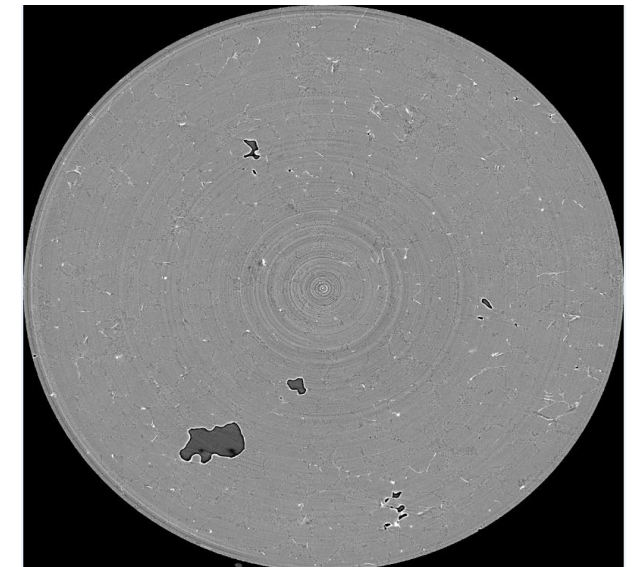
L-PBF 316L

- 3 industrial tomography (MATEIS)
 - 5 μm voxel size
 - $\varnothing 8 \text{ mm} \times 6.1 \text{ mm}$
- 3 synchrotron tomography (ESRF)
 - 1.7 μm voxel size
 - $\varnothing 8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$



Cast AlSi

- 5 industrial tomography (ICMB)
 - 5 μm voxel size
 - $\varnothing 7 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$
- 10 industrial tomography (MATEIS)
 - 5 μm voxel size
 - $\varnothing 3 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$
- 8 synchrotron tomography (ESRF)
 - 1.3 μm voxel size
 - $\varnothing 3 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$



Diffusion: définition

Principe:

- Bruitage progressif puis Prédiction du bruit : le réseau apprend à prédire et soustraire le bruit ajouté.
- Apprend les lois de distribution de la base d'entraînement dans un espace latent.

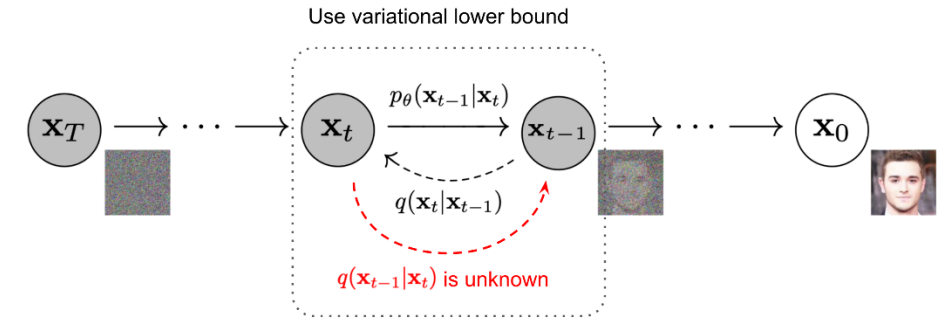
Quelques avantages :

- Fidélité et précision
- Convergence plus facile à atteindre

Points d'attention :

- Puissance de calcul nécessaire
- Temps d'inférence (~1 min / image)

R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz, P. Esser, et B. Ommer,
« High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models », 2022



'A painting of a
squirrel eating a burger'



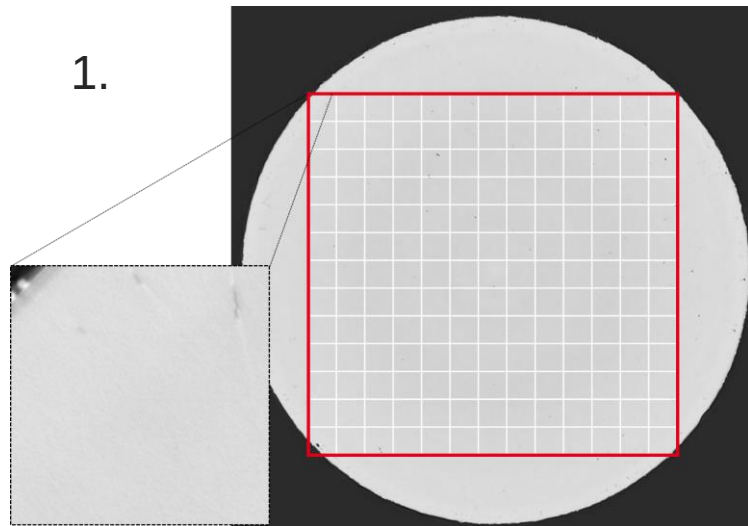
Génération conditionnelle

Mécanismes d'attention : Utiliser des LLMs pour conditionner les lois de distribution à des priors (ex. : **description textuelle**).

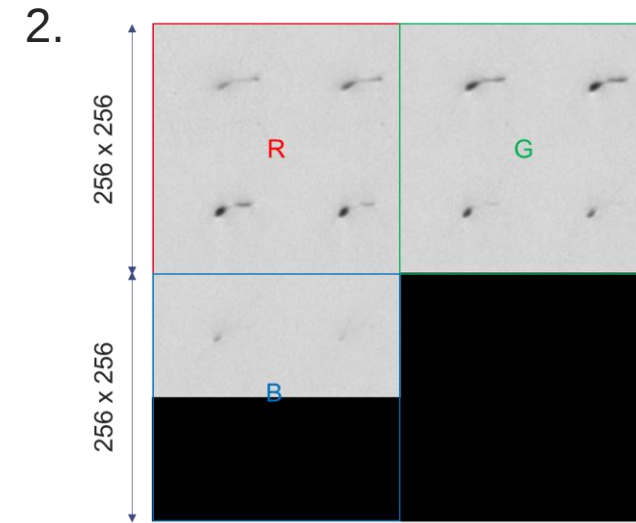
Préparation des **données**

1. Images **2D** ($1 \times N \times N$) *non centrée sur les défauts*
2. Images **2.5D** ($3 \times 4 \times N \times N$) $\rightarrow$ 12 niveaux en Z
3. Images **binaires 2.5D** ($3 \times 4 \times N \times N$)

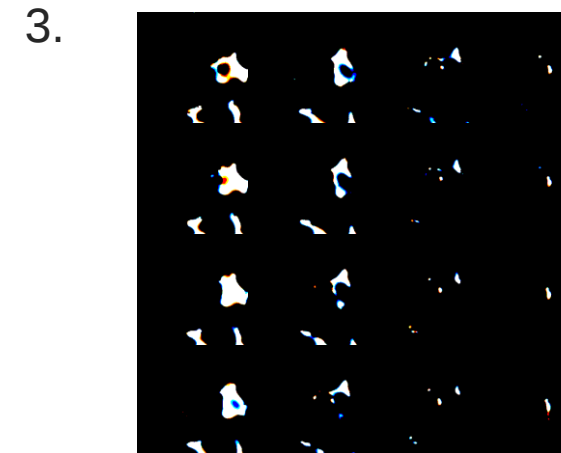
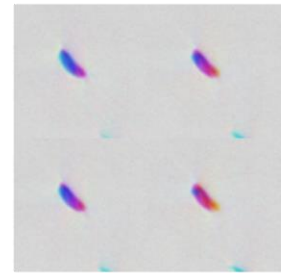
2 & 3 $\rightarrow$ Segmentation préalable des défauts



!= conditionnel

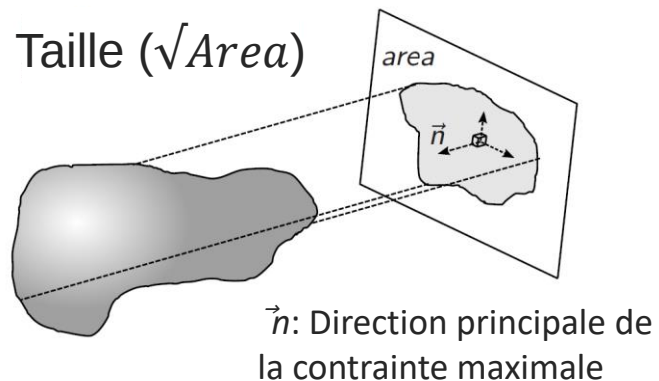


Profondeur
encodée dans
canaux RGB



Masquage des
défauts plus
encodage
RGB

Mise en formes des **conditions**

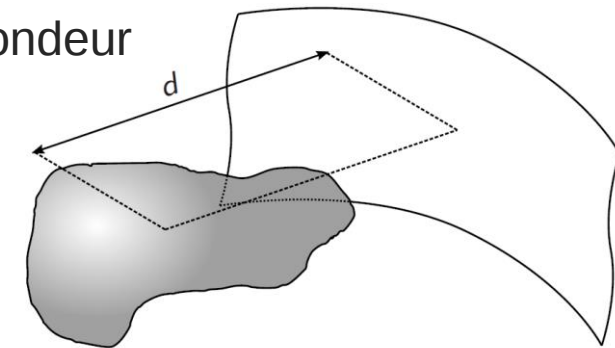


Description textuelle

- **Taille** : { petit, moyen, grand }
- **Profondeur** : { faible, moyen, important }

Texte **encodé en vecteur** par un modèle pré-entraîné

Profondeur



Taille

petit $:= \log(\sqrt{A}) < 1$
moyen $:= 1 \leq \log(\sqrt{A}) < 2$
grand $:= 2 \leq \log(\sqrt{A})$

Profondeur

faible $:= d < \sqrt[3]{V}$
intermédiaire $:= \sqrt[3]{V} \leq d < 3\sqrt[3]{V}$
importante $:= 3\sqrt[3]{V} \leq d$

Entraînements réalisés : résumé



Type de Diffusion	Non conditionnelle				Conditionnelle		
Type de données	2D	2.5D		Masquée	2.5D		Masquée
Matériau	316L	316L	Alsi	Alsi	316L	Alsi	Alsi
Dimension images	256x256	256x256	256x256	1024x1024	512x512	512x512	1024x1024
Taille d'échantillon	1511	22031	6979	2609	2609	2609	2609
Durée d'entraînement	8h	48h	72h	48h	4h	8h	24h
Score FID	NP	13.62	77	79			

Génération non conditionnelle:

Entraînement *from scratch* d'un modèle de diffusion DDPM

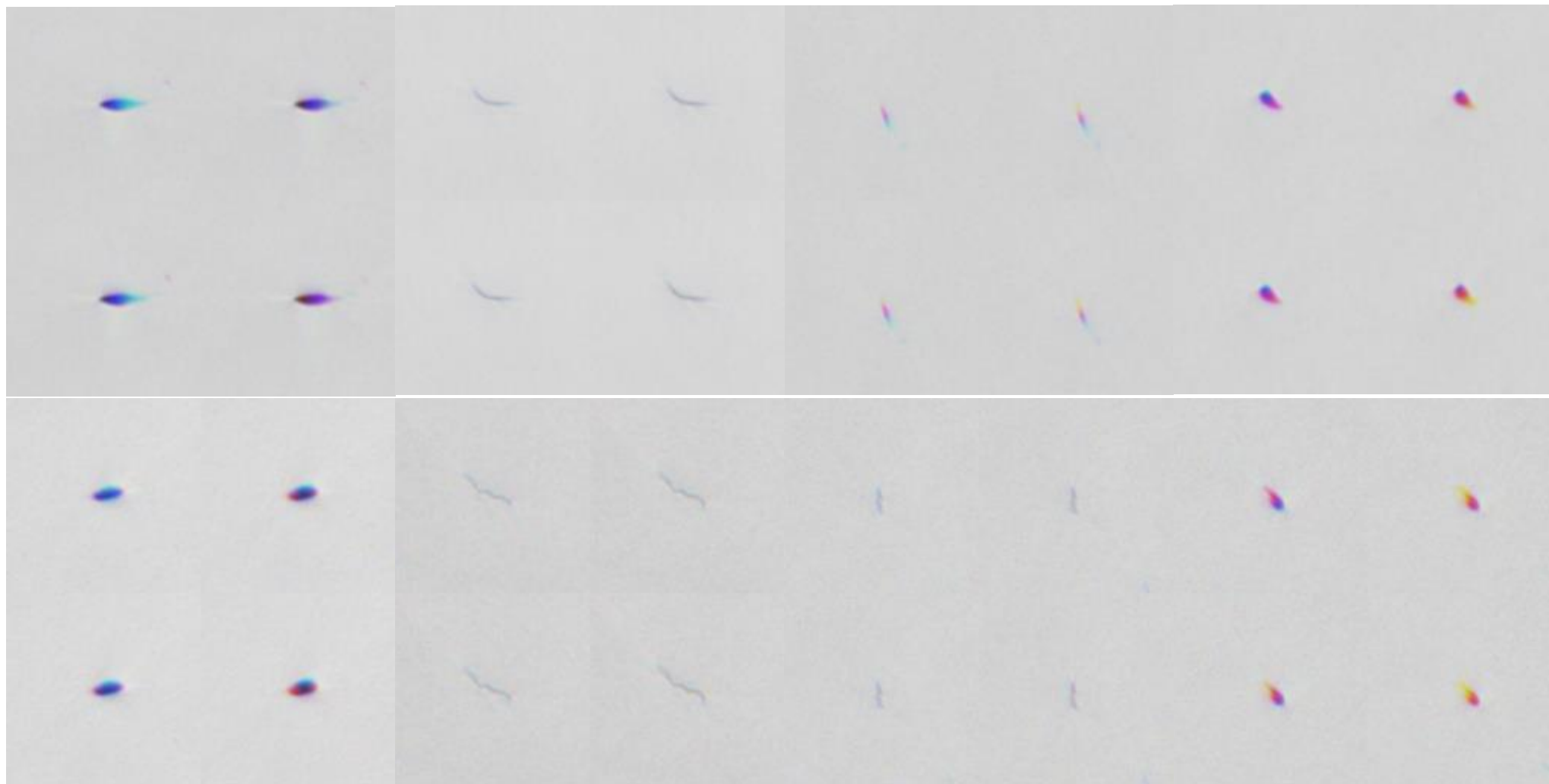
Génération conditionnelle:

Réentraînement d'un modèle Stable Diffusion (plus récent = plus performant)

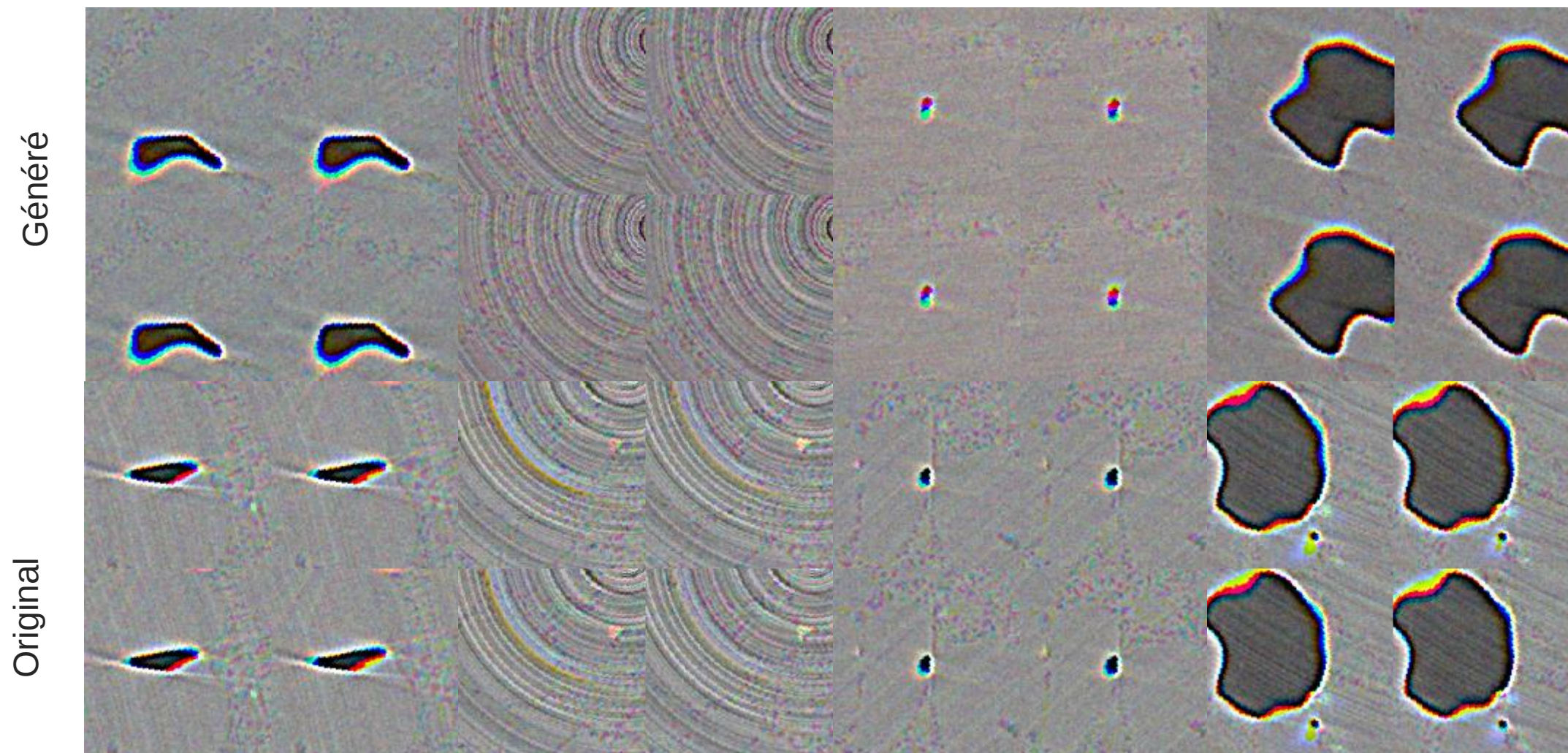
Génération de défauts 2.5D (316L)

Généré

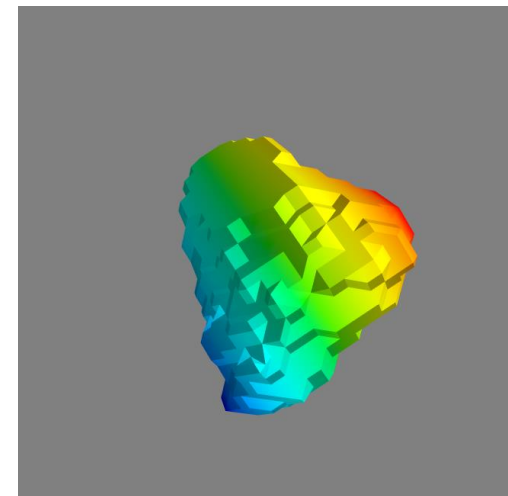
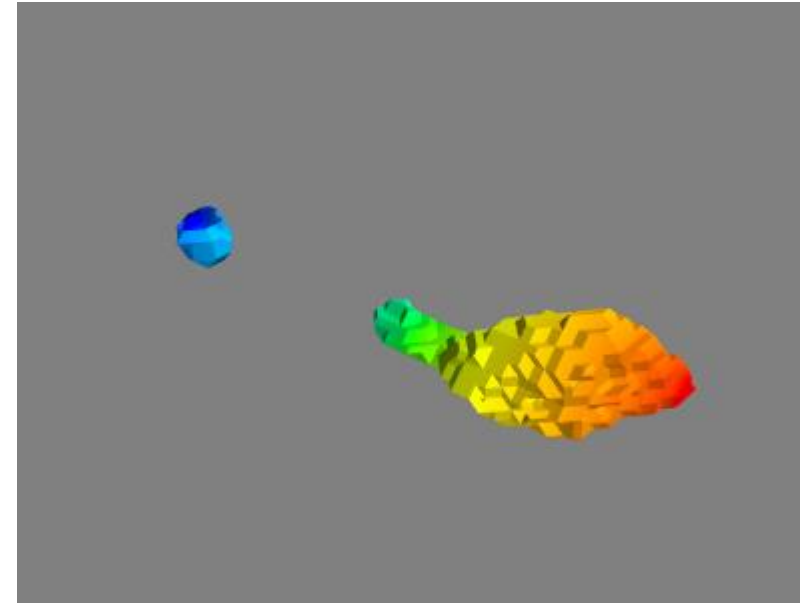
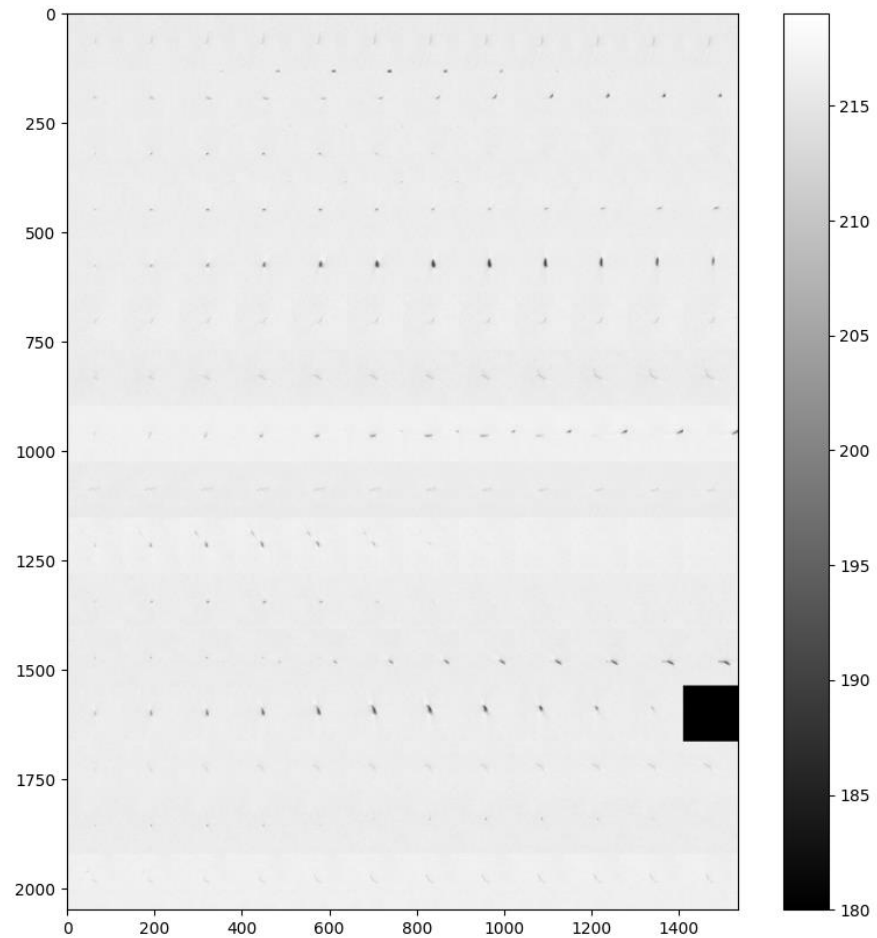
Original



Génération de défauts 2.5D (AlSi)

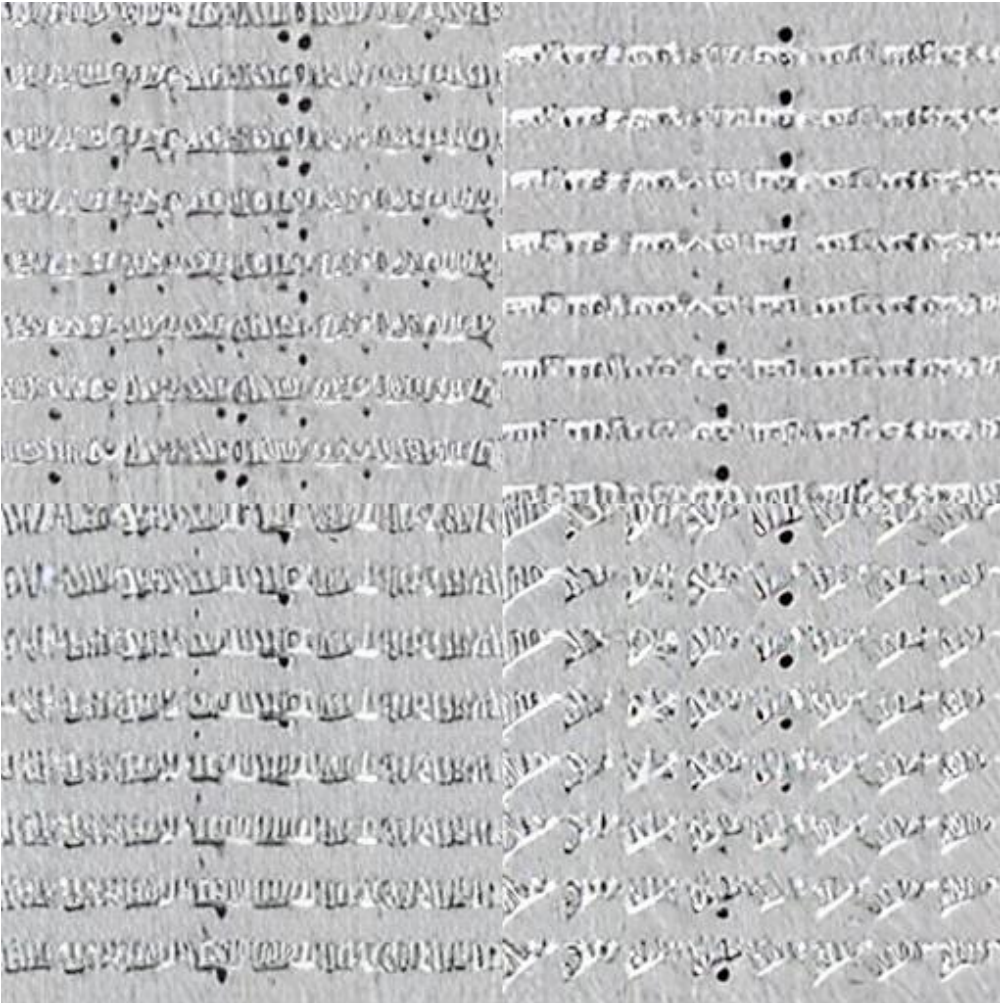


Reconstruction **2.5D** $\rightarrow$ **3D**

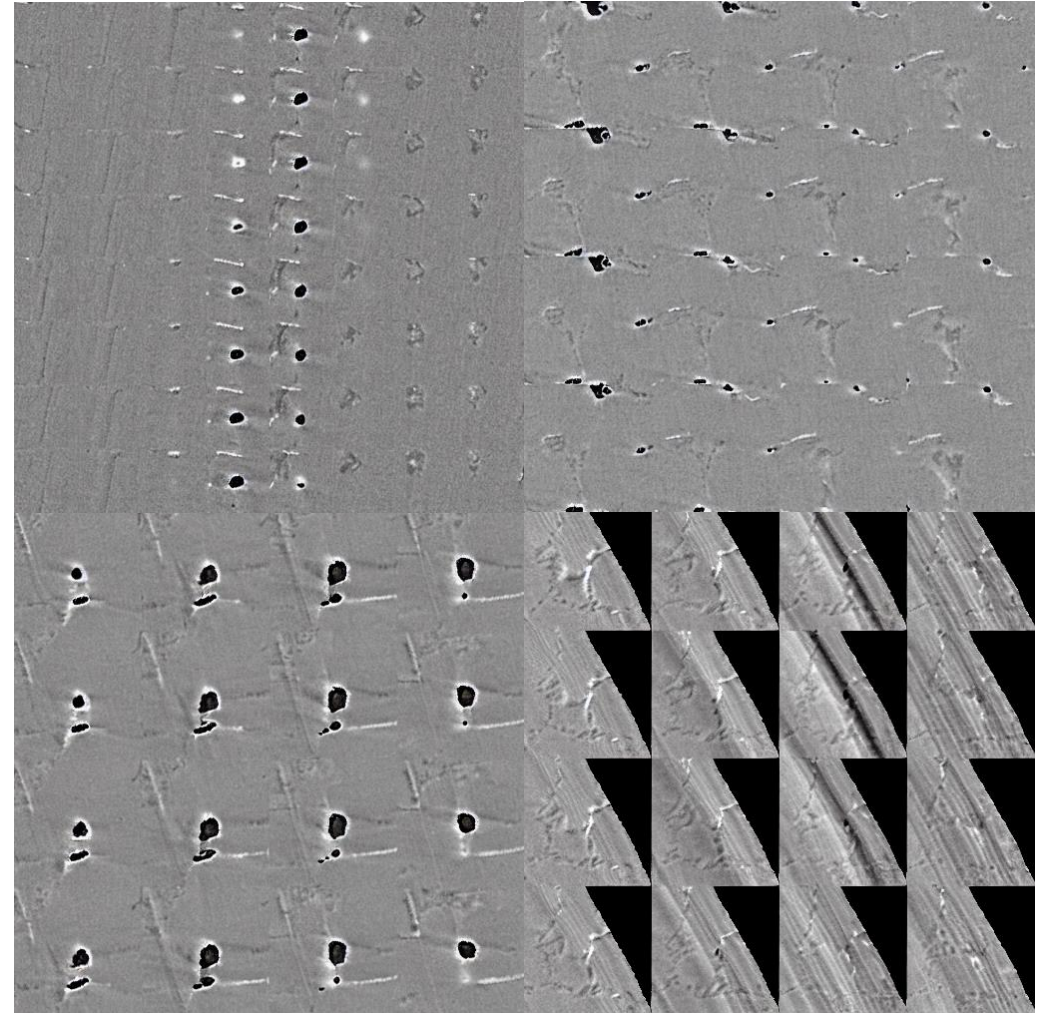


Génération conditionnelle

316L : volume grand sphéricité élevée



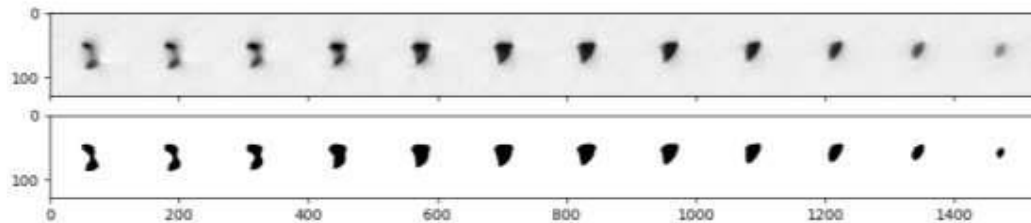
AlSi: taille grand profondeur moyenne



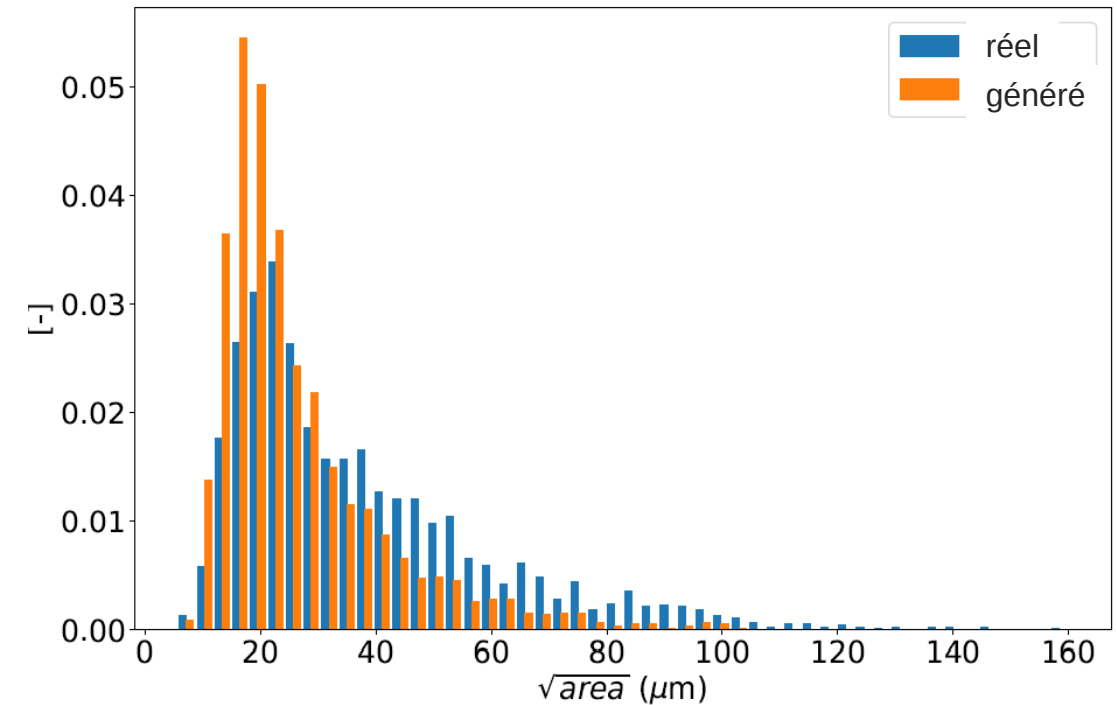
Calcul en **fatigue** (316 L)



Segmentation des défauts



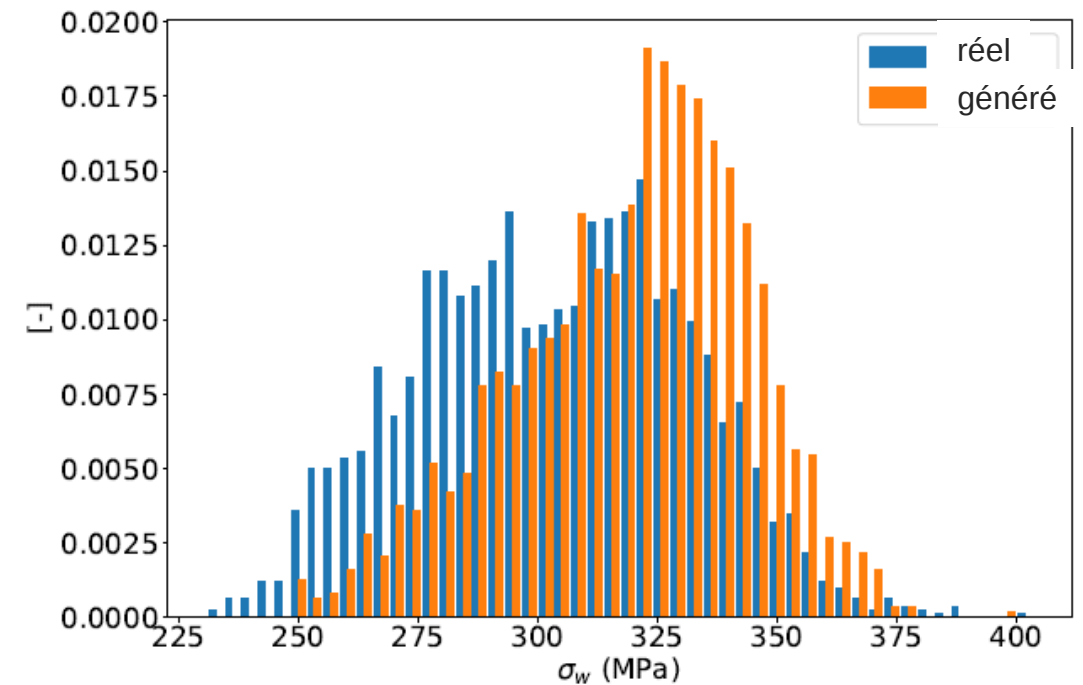
Distribution des défauts par **taille**



Calcul en fatigue

$$\sigma_w = \frac{f(HV + 120)}{(\sqrt{area})^{1/6}} \times \left(\frac{1 - R}{2} \right)^\alpha, \quad \alpha = 0.226 + HV \times 10^{-4}$$

Distribution des défauts par **limite** en fatigue



Y. Murakami et M. Endo, « Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength », *International journal of fatigue*, vol. 16, n° 3, Art. n° 3, 1994.

Conclusions

Observations

- **Modèle de diffusion** pertinents pour la **génération de tomographies X** synthétiques
- La diffusion **conditionnelle** permet prendre en compte les **métadonnées**
- Un **critère de fatigue** peut être appliqué après la segmentation des données (réelles ou générées)

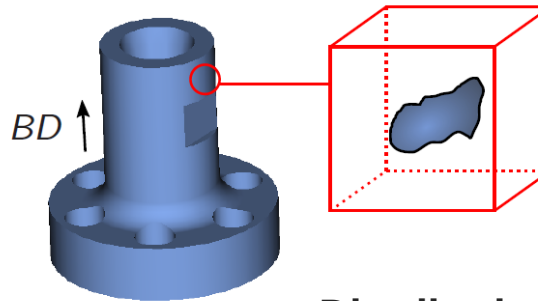
Perspectives : mieux **intégrer le contexte** du défaut (génération conditionnelle)

Matériau

- Composition chimique
- Chemin de solidification
- Comportement thermomécanique

Paramètres liés à la fabrication

- Puissance et vitesse du laser
- Direction de fabrication (BD)
- Motif de remplissage
- Stratégie de contour



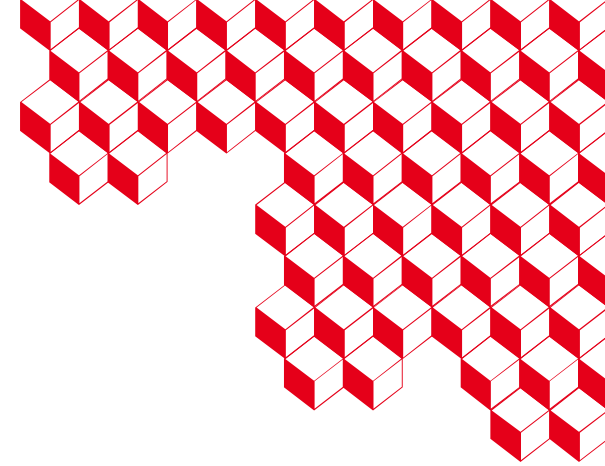
Géométrie

- Position dans la pièce
- Volume de la pièce
- Epaisseur

Distribution des défauts

- Probabilité de défauts
- Voisinage
- Distribution multi-échelle

➤ **Thèse débutant fin 2025**



Merci



Pierre DÉRIAN
Responsable scientifique

pierre.derian@cea.fr
+33 6 30 94 57 03

Sandra GAREL
Responsable de partenariats industriels

sandra.garel@cea.fr
+33 6 45 48 31 32

CEA Pays de la Loire, 4 allée du Rayon vert, 44340 Bouguenais