



Modélisation d'une chaîne de mesure pour estimer les incertitudes de mesure dimensionnelle en tomographie : application aux pièces de fabrication additive



Malik Enniafa



INSA-LVA – Valérie Kaftandjian (directrice de thèse)
LNE – Anne-Françoise Obaton (codirectrice de thèse)
Cetim – Sébastien Brzuchacz (encadrant en entreprise)



13/02/2023

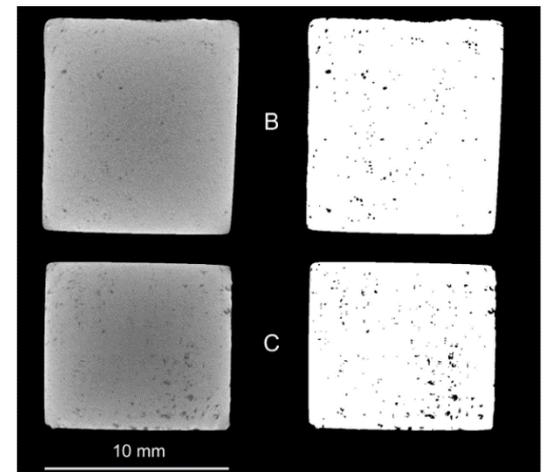
Sommaire

- ▶ Introduction
- ▶ La chaîne tomographique au service du contrôle dimensionnel
- ▶ Travail effectué
- ▶ Apport de la thèse
- ▶ Conclusion

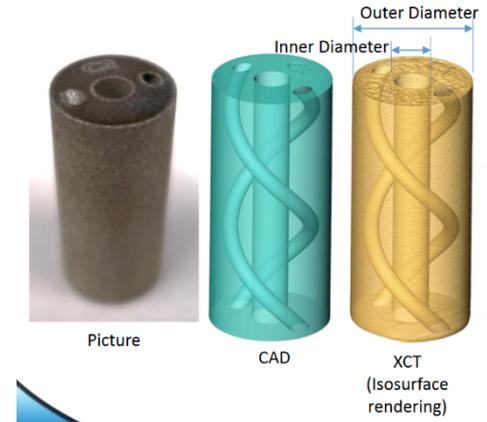
Introduction

Introduction

- ▶ Contexte : besoins industriels
 - ▶ Contrôle des défauts → caractérisation dimensionnelle de ces défauts
 - ▶ Mesures dimensionnelles → possibilité de les réaliser sur des mesurandes internes ou inaccessibles par autres moyens de mesure 3D
- ▶ Objectif de la thèse : modéliser complètement toute la chaîne de mesure dimensionnelle par tomographie
 - ▶ Évaluer l'influence des paramètres
 - ▶ Valider les performances
 - ▶ Proposition d'une pièce de référence
 - ▶ Recommandations de bonnes pratiques



An adaptive thresholding algorithm for porosity measurement of additively manufactured metal test samples via X-ray computed tomography. Joseph Lifton, Tong Liu. 2021.



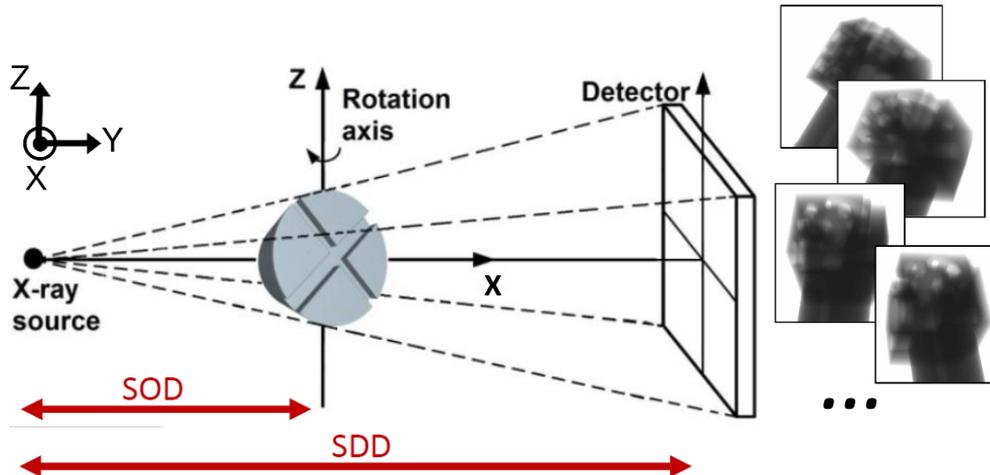
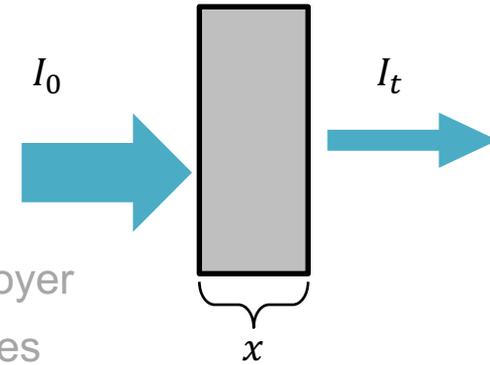
Applications of X-ray Computed Tomography (XCT) on Additive Manufacturing (AM). Felix Kim.

La chaîne tomographique au service du contrôle dimensionnel

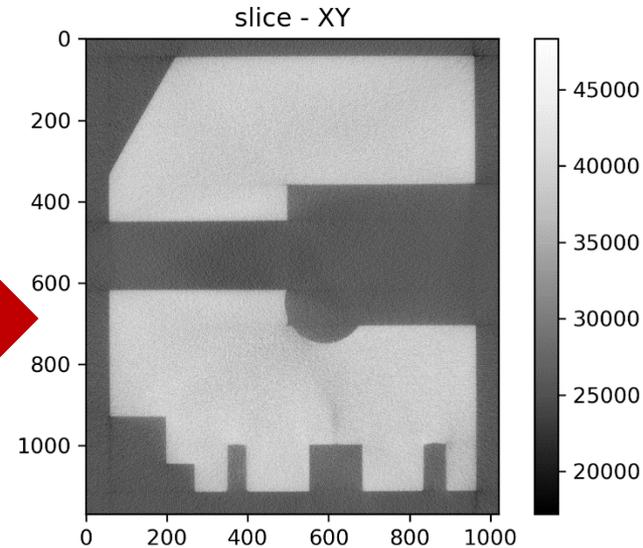
Processus d'acquisition

0 Principe : numérisation du coefficient d'atténuation

- ▶ Paramétrage : détecteur plan, axes et source mini/ μm foyer
- ▶ Corrections possibles : des projections, artefacts, filtrages
- ▶ Volume reconstruit : cylindrique et voxelique
- ▶ Algorithme utilisé : FDK – 1984



FDK

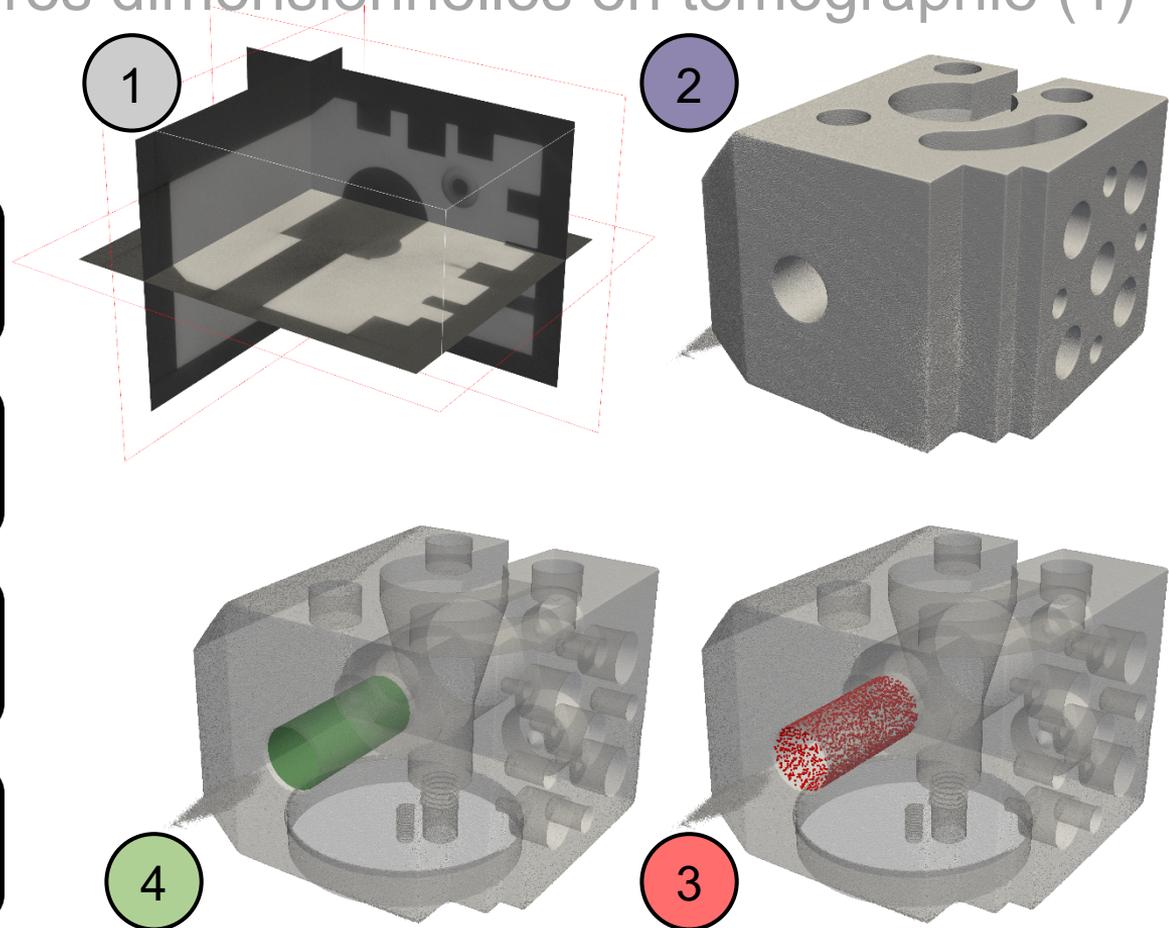


Taille de voxel = $0,085\mu\text{m}$

Protocole de mesures dimensionnelles en tomographie (1)

13/02/2023

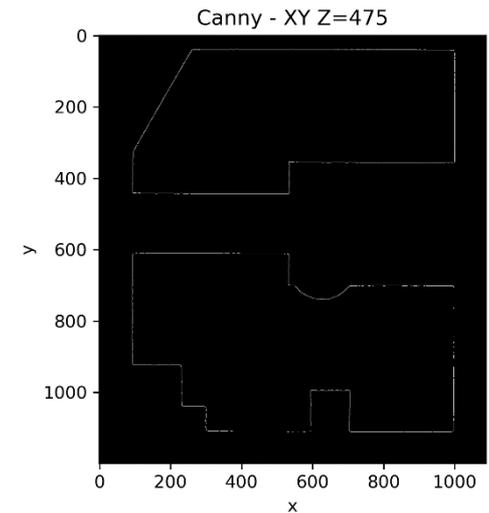
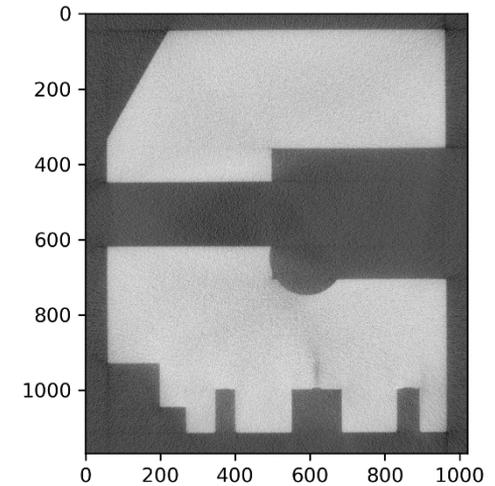
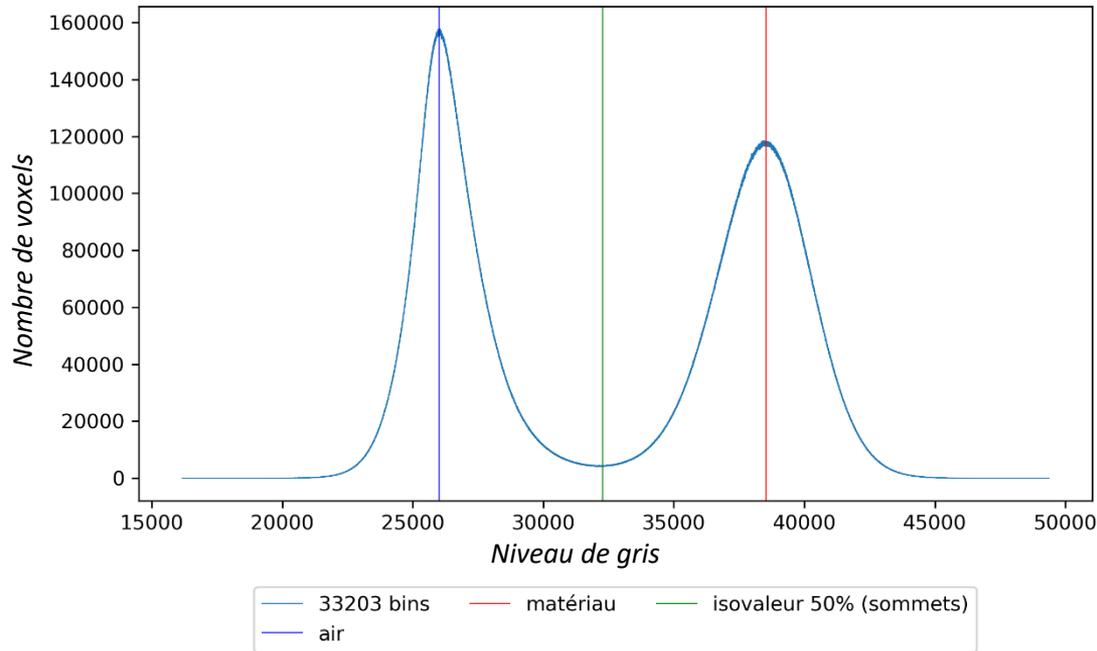
- 1 Définition de la surface
- 2 Extraction de la surface
- 3 Partitionnement des points à utiliser
- 4 Mesure dimensionnelle



Processus d'obtention de la surface

► Définition de la surface à extraire :

- Selon les niveaux de gris
- Selon les variations des niveaux de gris

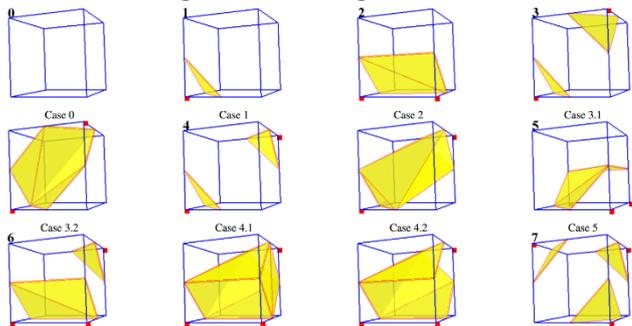


Processus d'obtention de la surface

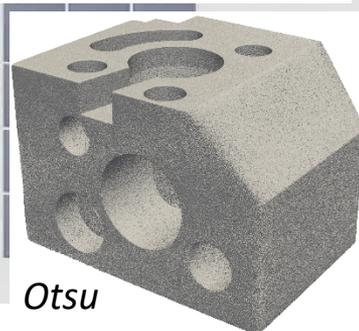
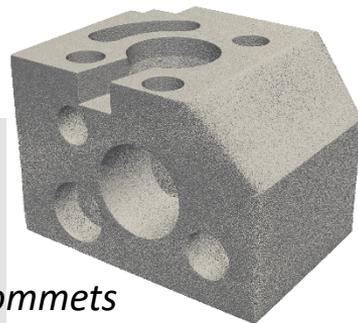
▶ Algorithme d'extraction de la surface :

- ▶ Sur quels paramètres je peux jouer pour extraire au mieux la surface ?
 - ▶ De manière plus ou moins locale, considération des orientations 3D quelconques, etc.
- ▶ Orienté mono matériaux (thèse)

Les 8 sommets des cubes sont les centres des 8 voxels connexes, leur valeur est un niveau de gris (original ou segmenté)

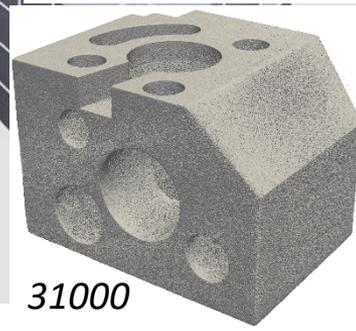


Iso 50 sommets



Otsu

Iso 50 aires



31000

Processus de mesure dimensionnelle

Partitionnement :

Géométrique → sous volume (*CHOIX*)

Statistique → écarts à la mesure
(*points, grandeur*)

Selon NdG → pentes ESFs
(*pentés locales*)

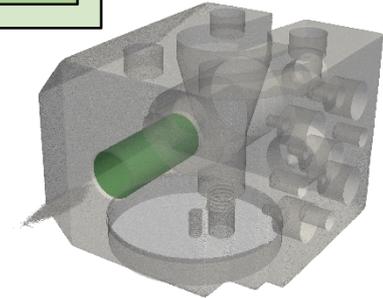
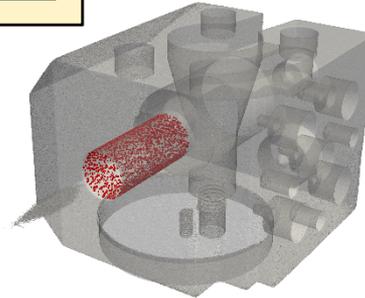
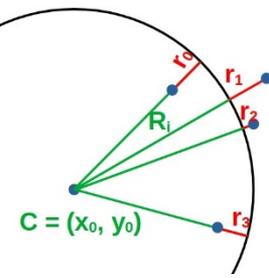
Mesures dimensionnelles :

Critère des Moindres Carrés (*points*)

Critère de Chebychev (*points*)

Critère élément minimum (*points*)

Critère élément maximum (*points*)

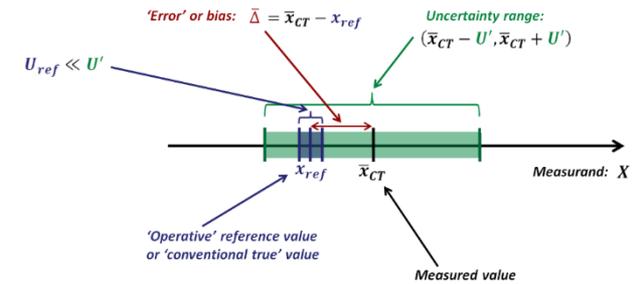


- ▶ Limité aux moindres carrés, car peu sensible au bruit très présent en tomographie (et méthode de mesure par champ plus généralement)
 - ▶ Pas/Peu d'investigation du filtrage statistique qui peut dégrader la mesure
 - ▶ Inclusion d'une méthode de partitionnement utilisant les niveaux de gris locaux

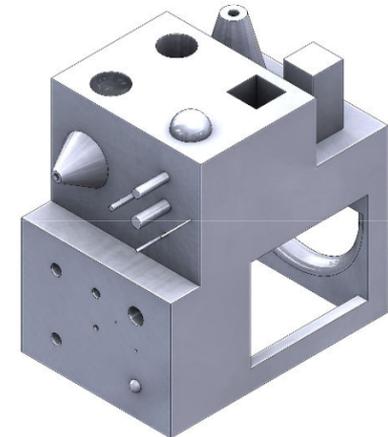
Travail effectué

Étude bibliographique

- ▶ Fonctionnement de la chaîne de mesure
 - ▶ Tomographie (principe + matériel)
 - ▶ Traitements numériques (prétraitements, reconstructions, corrections, obtention de la surface en données 2D/3D...)
- ▶ Méthode de détermination des incertitudes : iso 15530
 - ▶ Prise en compte du biais ou de sa correction
- ▶ Influence des paramètres
 - ▶ Par simulation (récent) ou expérimental
 - ▶ Développement d'une méthode, algorithmique ou procédure
 - ▶ Inconvénient : présentation des résultats finaux sans explications ou détails sur les impacts au niveau des différentes étapes de la chaîne de mesure
- ▶ Critères (dont ndg) pour estimer la qualité de la mesure



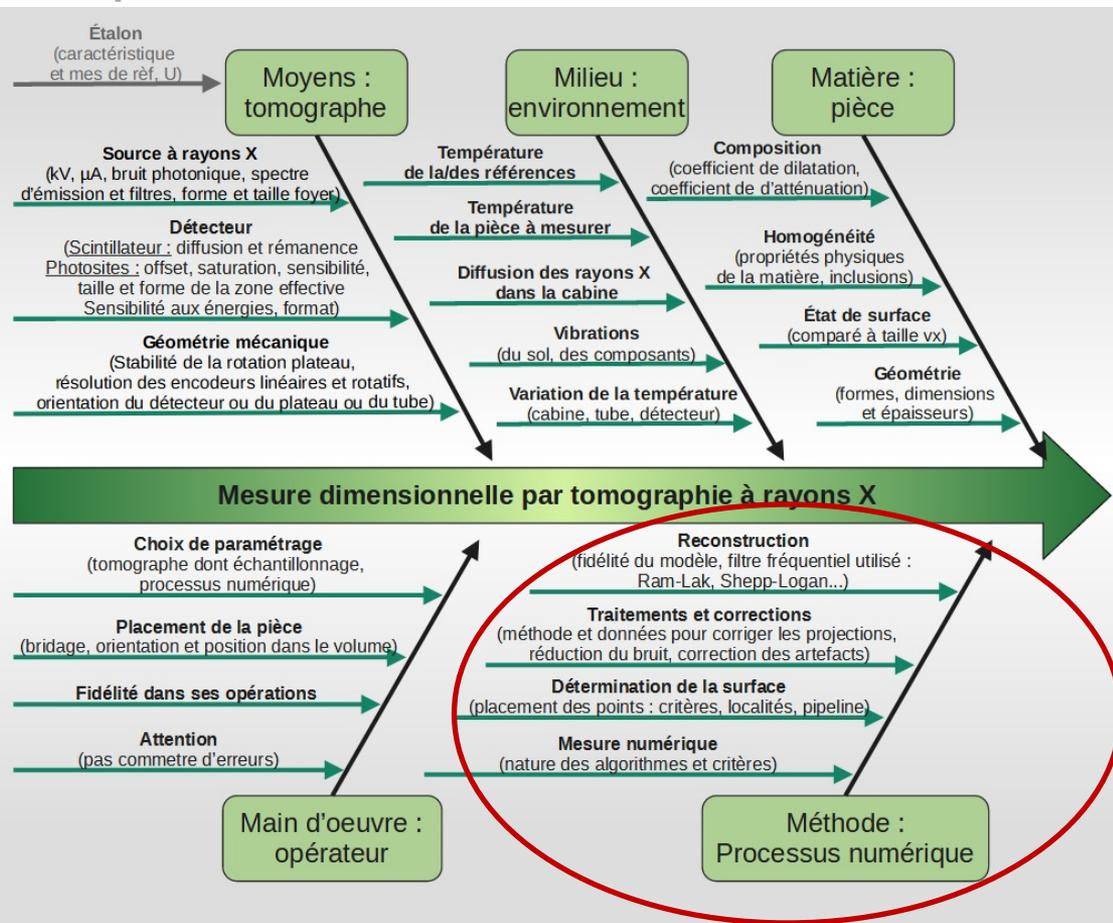
Studies of dimensional metrology with x-ray cat scan. Hermin Villarraga Gómez. 2018.



Novel dedicated reference standards for the qualification of radiography-based computed tomography simulation software. Fabrício Borges de Oliveira, Tamara Reuter, David Plotzki, Markus Bartscher, Tino Hausotte. 2022.

Étude de l'influence des paramètres

► 5M de la mesure dimensionnelle en Tomographie



Méthodes d'évaluation des incertitudes

► Les démarches d'estimation des incertitudes peuvent être de différents types :

► Analytique : propagation des incertitudes de chaque paramètre dans un modèle analytique

GUM 1995 avec des corrections mineures.
BIPM. 2008

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad \text{Combinaison des variances}$$

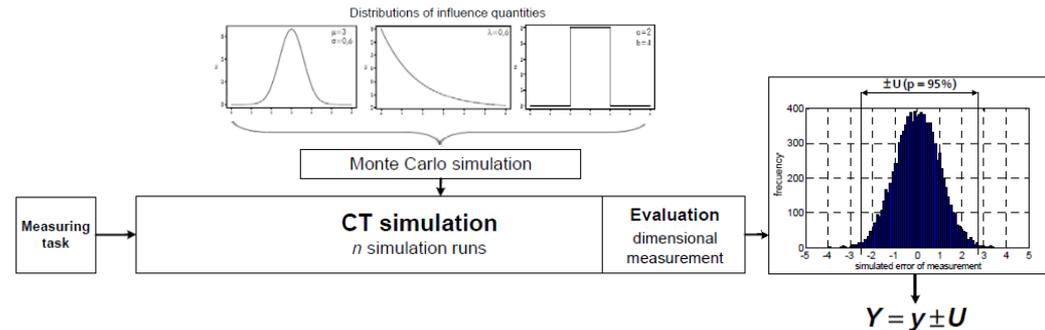
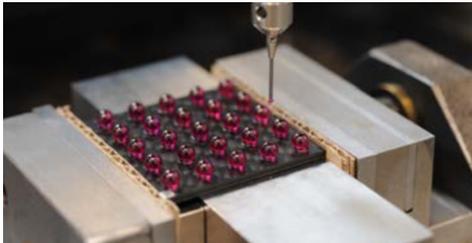
$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j) \quad \text{avec les covariances}$$

► Simulé : propagation des densités de probabilité des paramètres, dans un programme simulant le processus de mesure

Coordinate Metrology by Traceable Computed Tomography.
Müller Pavel.
2013.

► Empirique : comparaison à une pièce étalonnée par un moyen métrologique (plus « précis »)

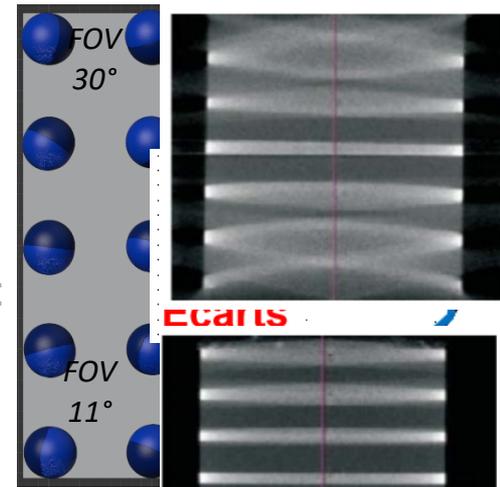
► Mixte



Étude de l'influence des paramètres

0 Etude paramétrique par simulation (CIVA)

- ▶ Paramètres des composants du tomographe à évaluer :
 - ▶ Positionnement des éléments clés
 - ▶ Source (spectre, foyer)
 - ▶ Détecteur (pitch, scintillateur, bruit photonique...)
- ▶ Identifier les biais de la simulation
 - ▶ Ex: maillage de l'objet



1

2

Influence de la détermination de la surface : définition et extraction

3

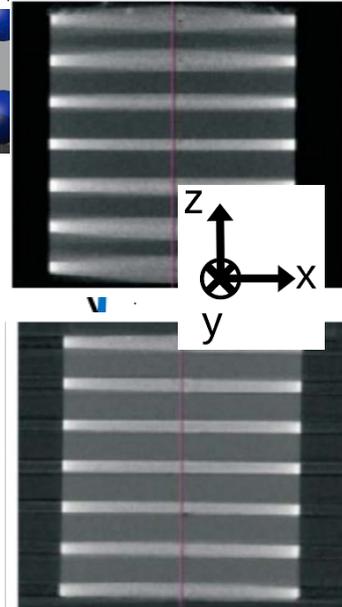
Apport d'un partitionnement adapté aux données voxeliques

4

Influence de la nature et de la position des mesurandes

- ▶ Courbure, interne/externe, « enveloppe matière », orientation...

FOV
5°



Integrated Quality Control of Precision Assemblies using Computed Tomography.
Stolfi Alessandro. 2017.

Processus d'obtention de la surface – définitions

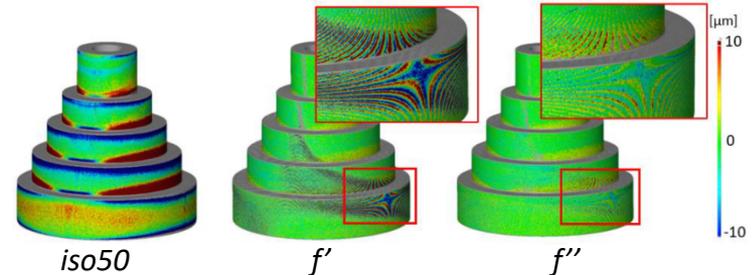
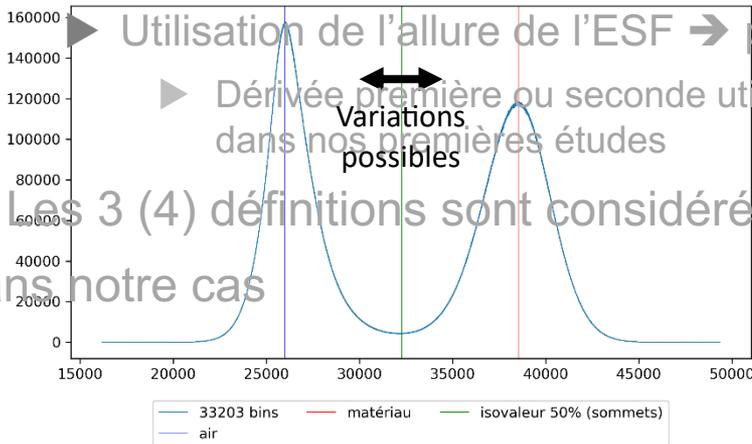
► Définitions utilisées dans la bibliographie :

- ▶ Iso50, milieu entre les 2 populations en considérant leur position par leur maximum
 - ▶ Variante Obrist considère les aires des « gaussiennes » de l'air et du matériau
- ▶ Otsu, très utilisé en imagerie (minimisation des variances intra-population)
 - ▶ Yen et Li émergent aussi en imagerie, plutôt plus performants mais pas dans nos tests en tomographie (et bien plus lourds)

► Utilisation de l'allure de l'ESF → position du point d'inflexion comme frontière

► Dérivée première ou seconde utilisées, semblent meilleures dans la biblio comme dans nos premières études

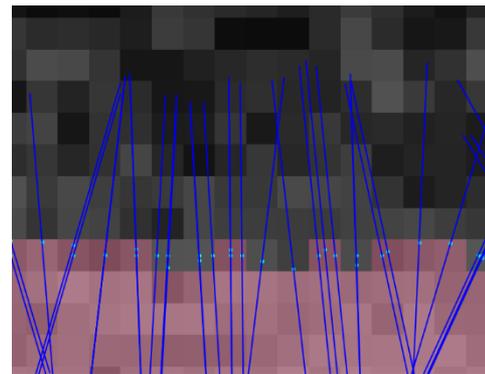
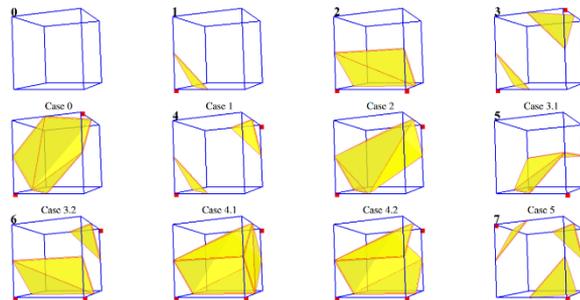
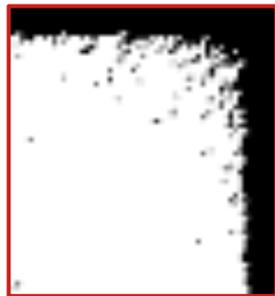
► Les 3 (4) définitions sont considérées dans notre cas



High-accuracy Surface Extraction Using the High-order differentiation of X-ray CT Values. Tomoya OTA et al. 2022.

Processus d'obtention de la surface – Paramètres

- ▶ Débruitage du volume (avant ou après segmentation)
- ▶ Création des points de la surface de l'objet (LUT Chernyaev - 1995)
 - ▶ Frontière obtenue subvoxelique depuis algorithme Marching Cubes – 1987
- ▶ Affinement de la frontière par ajustement de la position des points selon l'orientation de la surface locale
- ▶ Possibilité de choisir entre affinement global (volume entier) ou local (mesurande, sous volume, pour chaque point)



Suite de la thèse

Proposition de pièces de référence pour le contrôle dimensionnel en tomographie

- ▶ Utilisation d'une ball plate (plaque à billes)
 - ▶ Remplace l'usage de la tige à 2 billes pour corriger la taille de voxel
 - ▶ Réduction des erreurs grâce aux mesures dans différentes orientations (« reversal method »)
 - ▶ Suffisamment stable dans le temps
 - ▶ Mesure dans le champ de projection → rend compte des distorsions dans le volume reconstruit

- ▶ Nécessité de développer une pièce de référence avec mesurandes et cavités internes
 - ▶ Les pièces à scanner devront être similaires
 - ▶ En atténuation, géométrie, transmission minimale, SNR/CNR... à définir en simulation.

Apport de la thèse

Apport de la thèse

- ▶ Etude de l'influence des paramètres de la chaîne de mesure tomographique incluant l'extraction de la surface sur les images reconstruites
- ▶ Maîtrise complète de l'extraction de surface en développant un algorithme spécifique (pas d'utilisation de boîte noire)
- ▶ Elaboration d'une démarche pour déterminer les incertitudes de mesure d'un équipement (en incluant le logiciel de traitement)
 - ▶ Guide de bonnes pratiques



Etat d'avancement

Conclusion

Réalisé :

- Simulation : influence des défauts de positionnements et d'orientations des éléments clés d'un tomographe

En cours :

- Rédaction de la bibliographie
- Développement de l'algorithme d'extraction de surface (à finaliser : affinement de la position locale en 1 point)

Démarrage :

- Simulations paramétriques (sources, détecteur, surfaces)

A réaliser :

- Pièce de références monomatériau et multi-mesurandes
- Validation expérimentale

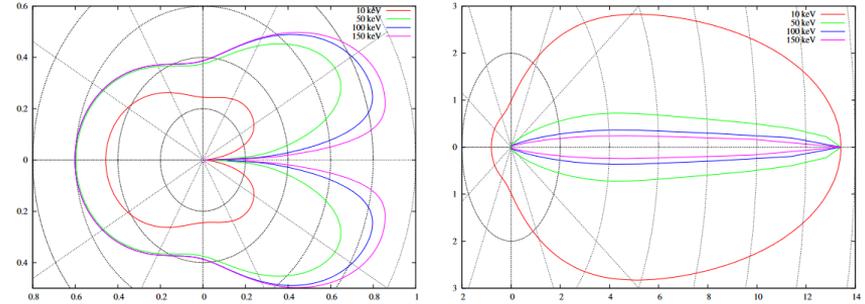
Tâches de fond :

- Veille bibliographique, participation à des conférences (CIM23, Cofrend23)...
- Refactorisation du code, parallélisation multicœurs

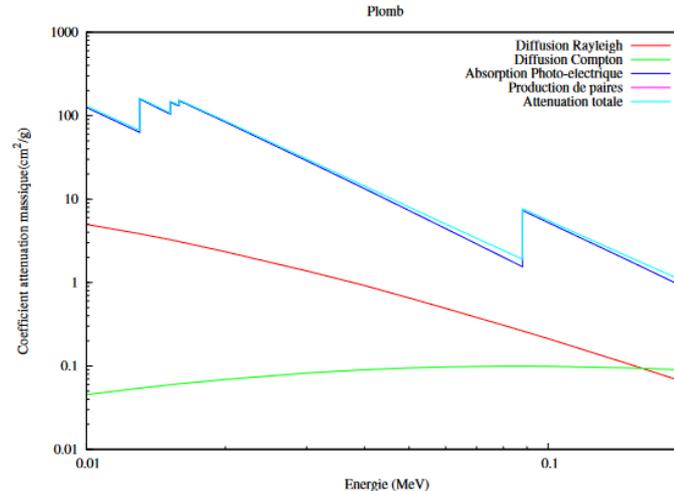
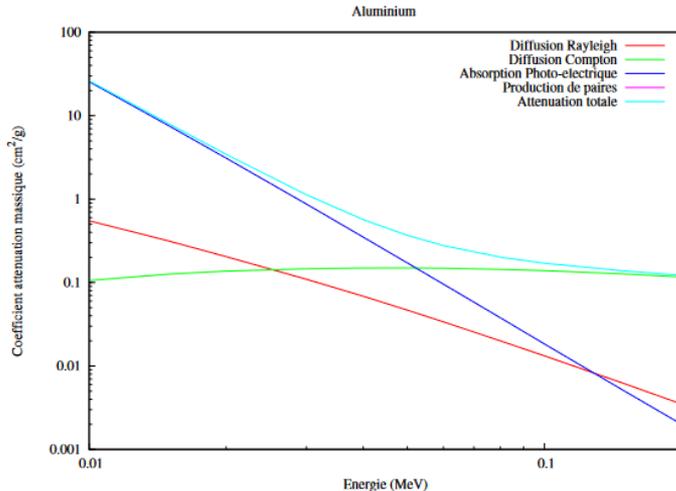
Merci de votre attention

Interactions avec la matière

- ▶ Diffusion de Rayleigh
- ▶ Diffusion de Compton
- ▶ Absorption photoélectrique
- ▶ Production de pair



Représentation polaire des sections efficaces différentielles (en barns / stéradian) de diffusion de Compton (gauche) et diffusion Rayleigh (droite) pour l'aluminium.



Tomographie par rayons X :
correction des artefacts liés
à la chaîne d'acquisition.
Patricia Wils. 2011.

Processus d'acquisition

Les artefacts :

- ▶ Bruit du détecteur et des corrections numériques
 - ▶ Dont les artefacts en anneaux ou le BHC
- ▶ Pénombre : engendre un flous géométrique
- ▶ Dans une moindre limite : la diffusion des photons optiques dans le scintillateur du détecteur

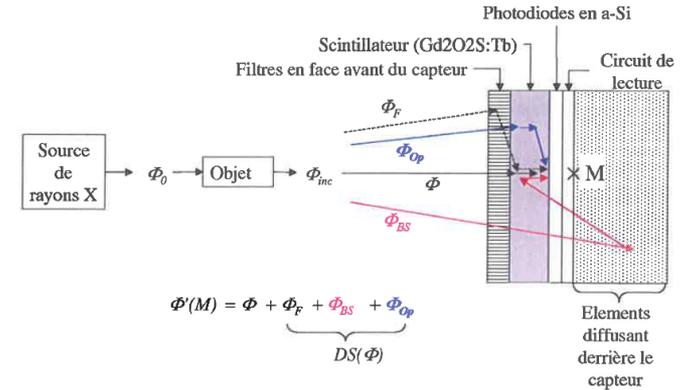
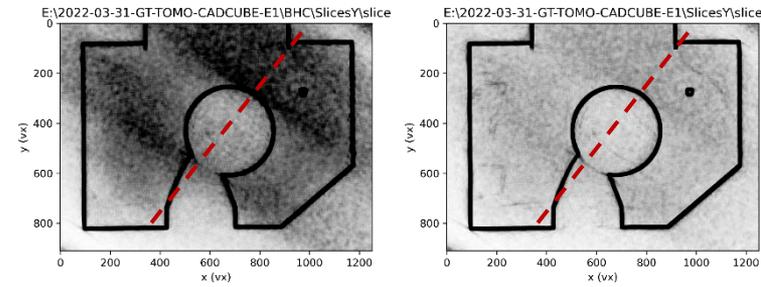
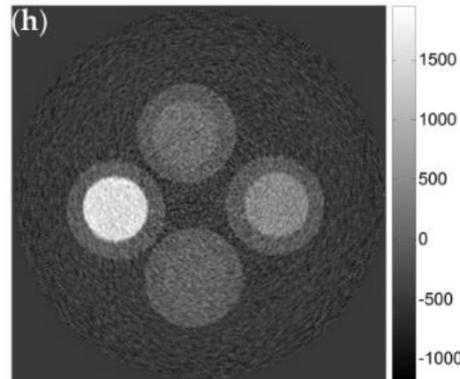
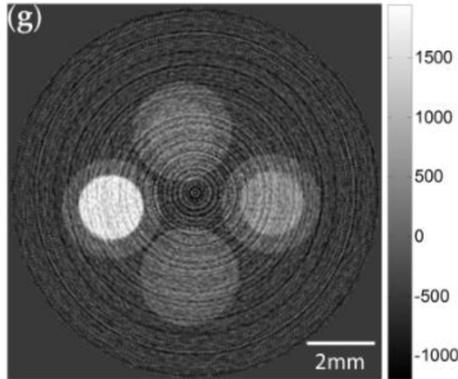
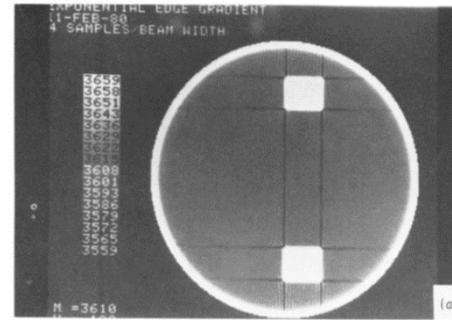


FIG. 3.4 – Contribution à une mesure $\phi'(M)$. $\phi'(M)$ est la somme de ϕ , la part du rayonnement incident sur le capteur ϕ_{inc} absorbée par le scintillateur, la part ϕ_F diffusée dans les filtres, le rétro diffusé ϕ_{BS} et le diffusé optique ϕ_{OP} .

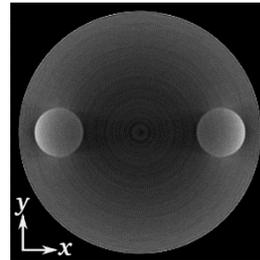
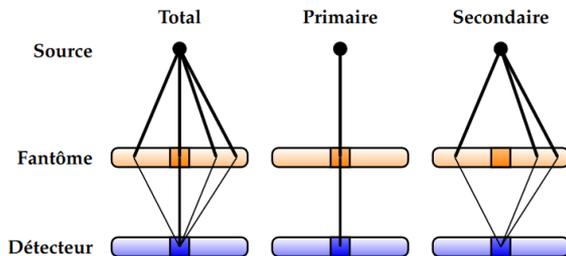
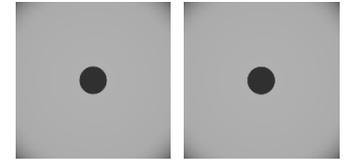
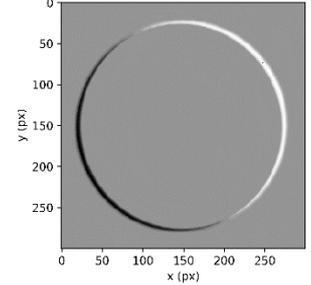
Processus d'acquisition

Les artefacts :

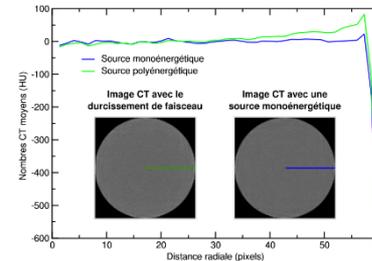
- ▶ Causé par le diffusé :
 - ▶ Éclaircissement des bords
 - ▶ Effet cuvette au centre de la matière
 - ▶ Ombrage, en forte variation d'épaisseur
- ▶ EEGE (Exponential Edge-Gradient Effect) : il est la conséquence d'une différence de valeur entre les intégrales de lignes d'atténuation de la modélisation et les intégrales volumiques de l'acquisition réelle
- ▶ Etc. (mécanique)



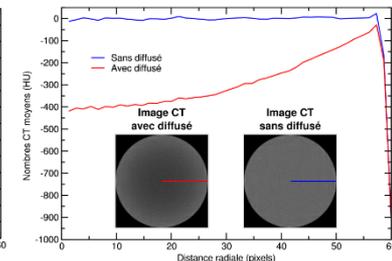
soustraction images absolues : 0000 - 0342



Courbes de profil radial



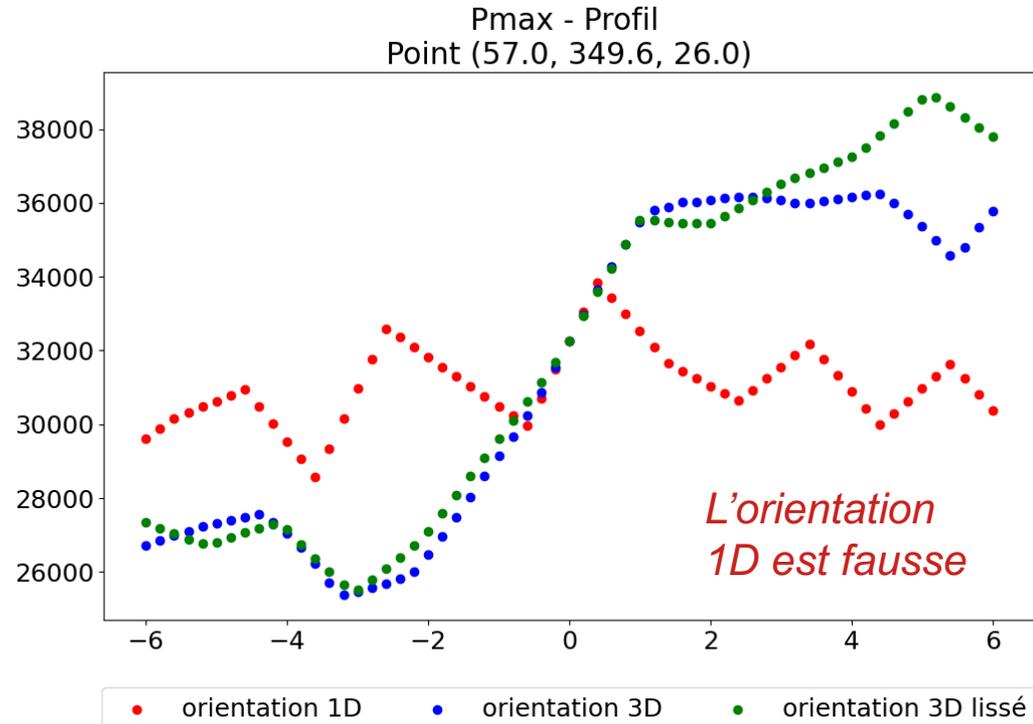
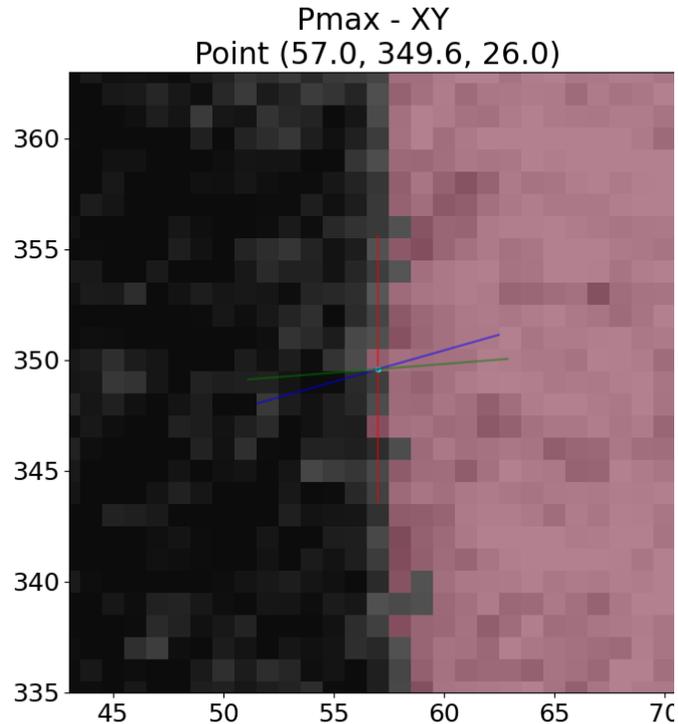
Courbes de profil radial



Orientation 3D des ESF

▶ Exemple d'ESF individuelles extraites : Intérêt du 3D

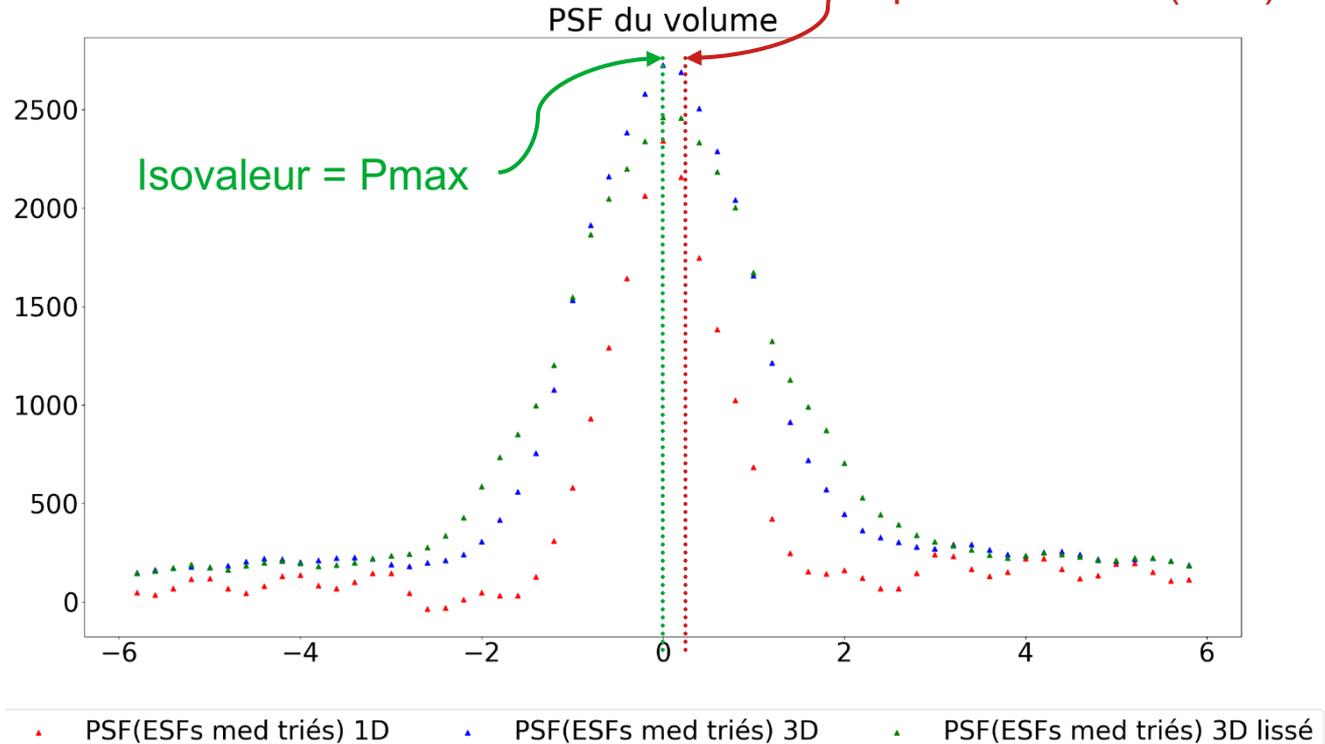
13/02/2023



Ajustement des positions de points

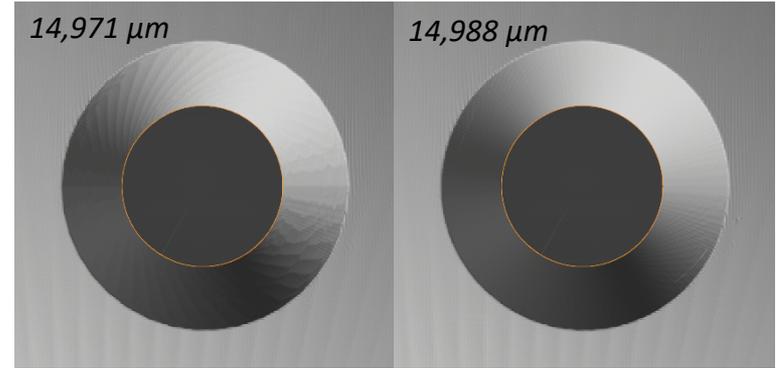
PSF globale = dérivée de l'ESF globale

Max PSF =
point inflexion (ESF)

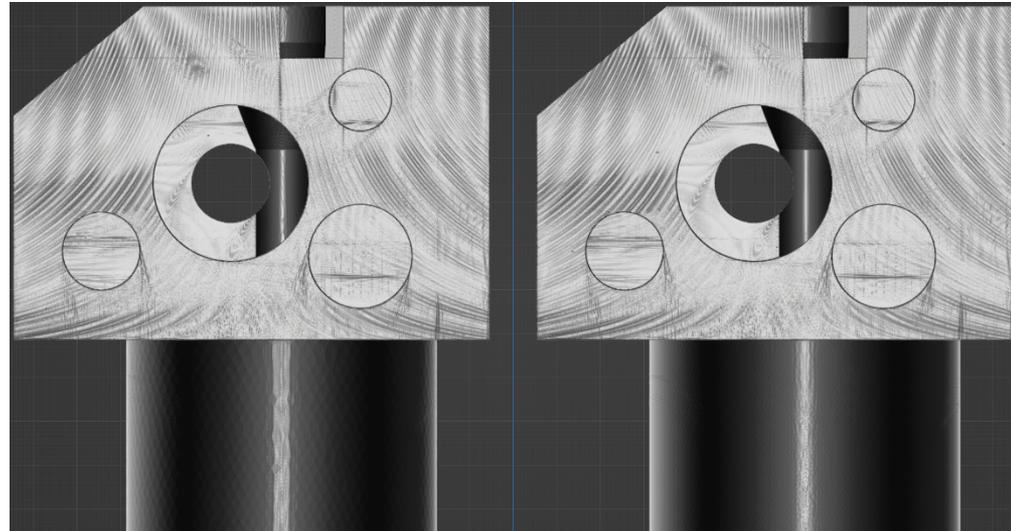
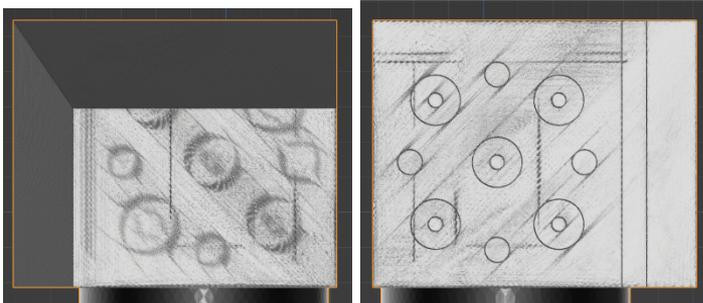


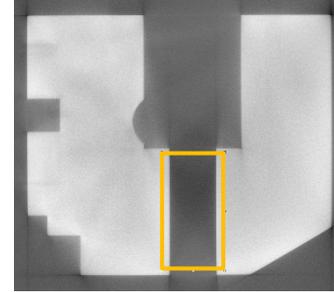
Biais de la simulation

- ▶ Rayon de courbure biaisé par le maillage de la surface paramétrique (CAO)



- ▶ Absence de flou
- artefacts très contrasté





Application des protocoles sur CadCube

Mesurande M2 = diamètre du cylindre (MMT réf = 15,233 mm) :

		Global (volume entier)				Local au cylindre					
Méthode		Non triés		Triés selon pente		Méthode		Non triés		Triés selon pente	
		M2 (mm)	Écart absolu (μ m)	M2 (mm)	Écart absolu (μ m)			M2 (mm)	Écart absolu (μ m)	M2 (mm)	Écart absolu (μ m)
<i>Cylindre entier</i>	PmaxG1_MC	15,315	82	15,229	-4	PmaxLc_MC	15,263	30	15,217	-16	
	PmoyG1_MC	15,321	88	15,229	-4	PmoyLc_MC	15,307	74	15,226	-7	
	OtsuG1_MC	15,361	128	15,237	4	OtsuLc_MC	15,256	23	15,215	-18	
	Pmax3sG1_MC	16,206	973	15,395	162	Pmax3sLc_MC	15,513	280	15,262	29	
	PmaxG1_Hyst_0.5_MC	15,345	112	15,383	150	PmaxLc_Hyst_0.5_MC	15,313	80	15,202	-31	
<i>Moitié côté interne</i>	PmaxG1_MC	15,389	156	15,250	17	PmaxLc_MC_patrInt	15,153	-80	15,193	-40	
	PmoyG1_MC	15,397	164	15,251	18	PmoyLc_MC_patrInt	15,217	-16	15,211	-22	
	OtsuG1_MC_patrInt	15,451	218	15,262	29	OtsuLc_MC_patrInt	15,228	-5	15,215	-18	
	Pmax3sG1_MC_patrInt	16,542	1309	15,767	534	Pmax3sLc_MC_patrInt	14,932	-301	15,119	-114	
	PmaxG1_Hyst_0.5_MC_patrInt	15,456	223	15,430	197	PmaxLc_Hyst_0.5_MC_patrInt	15,153	-80	15,180	-53	
<i>Moitié côté externe</i>	PmaxG1_MC_patrExt	15,227	-6	15,211	-22	PmaxLc_MC_patrExt	15,319	86	15,255	22	
	PmoyG1_MC_patrExt	15,228	-5	15,212	-21	PmoyLc_MC_patrExt	15,290	57	15,243	10	
	OtsuG1_MC_patrExt	15,245	12	15,221	-12	OtsuLc_MC_patrExt	15,255	22	15,226	-7	
	Pmax3sG1_MC_patrExt	15,381	148	15,278	45	Pmax3sLc_MC_patrExt	15,619	386	15,339	106	
	PmaxG1_Hyst_0.5_MC_patrExt	15,214	-19	15,235	2	PmaxLc_Hyst_0.5_MC_patrExt	15,316	83	15,233	0	

Les mesures ~~Toutes les mesures~~ s'améliorent Les mesures ~~Les écarts~~ sont négatifs
 du cylindre sont plus éloignées grandement globalement
 de la référence que la partie Le côté interne donne des
 externes Nécessiter d'utiliser les point de la frontière négatifs son causé par le bruit

Application des protocoles sur CadCube

Mesurande M2 (entier ou moitiés) = diamètre du cylindre (MMT réf = 15,233 mm) :

Dilatation
thermique
~ 3µm max

		Local au cylindre				
		Méthode	Non triés		Triés selon pente	
			M2 (mm)	Écart absolu (µm)	M2 (mm)	Écart absolu (µm)
Pmax	Global	PmaxGL_MC	15,315	82	15,229	-4
	Local	PmaxLc_MC	15,263	30	15,217	-16
Point inflexion	Cylindre entier	PmaxGL_MC_Ptflx_1D_MC5iter	15,317	84	15,230	-3
		PmaxGL_MC_Ptflx_3D_MC5iter	15,332	99	15,242	9
		PmaxGL_MC_Ptflx_3Dlis_MC5iter	15,333	100	15,242	9
	Moitié côté interne	PmaxGL_MC_Ptflx_1D_MC5iter_patrInt	15,381	148	15,243	10
		PmaxGL_MC_Ptflx_3D_MC5iter_patrInt	15,364	131	15,230	-3
		PmaxGL_MC_Ptflx_3Dlis_MC5iter_patrInt	15,363	130	15,231	-2
	Moitié côté externe	PmaxGL_MC_Ptflx_1D_MC5iter_patrExt	15,253	20	15,236	3
		PmaxGL_MC_Ptflx_3D_MC5iter_patrExt	15,261	28	15,241	8
		PmaxGL_MC_Ptflx_3Dlis_MC5iter_patrExt	15,261	28	15,240	7
Iso 50 à partir des plateaux	Cylindre entier	PmaxLc_isoESF_MC_3iter	15,301	68	15,226	-7
		PmaxLc_isoESF_Hyst0.5_MC_3iter	15,424	191	15,213	-20
	Moitié côté interne	PmaxLc_isoESF_MC_3iter_patrInt	15,258	25	15,222	-11
		PmaxLc_isoESF_Hyst0.5_MC_3iter_patrInt	15,539	306	15,235	2
	Moitié côté externe	PmaxLc_isoESF_MC_3iter_patrExt	15,277	44	15,237	4
		PmaxLc_isoESF_Hyst0.5_MC_3iter_patrExt	15,208	-25	15,201	-32

→ Utilisation du point d'inflexion comme seuil (local aux points) meilleur dans l'ensemble (seuil initial = Pmax)

→ Pour ce dernier, les ESF mesurées en 3D sont fortement similaires et probablement meilleur que 1D

→ Utilisation du milieu des plateaux de l'ESF permet un seuillage assez bon

Taille de voxel = 84,99897µm