

**ANALYSE DE DONNÉES DE STRUCTURES SOUMISES À CHARGEMENTS
PAR TOMOGRAPHIE RX ET CORRÉLATION VOLUMIQUE**

APPLICATION À L'ÉTUDE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

S. Wantz⁽¹⁾⁽²⁾ , V. Valle⁽¹⁾ , Y. Pannier⁽¹⁾ , R. Brault⁽²⁾

(1) Institut Pprime, UPR 3346 CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, France

(2) CETIM Sud-Ouest, pôle EME², Pau



Journée des doctorants CETIM
17/18 janvier 2023

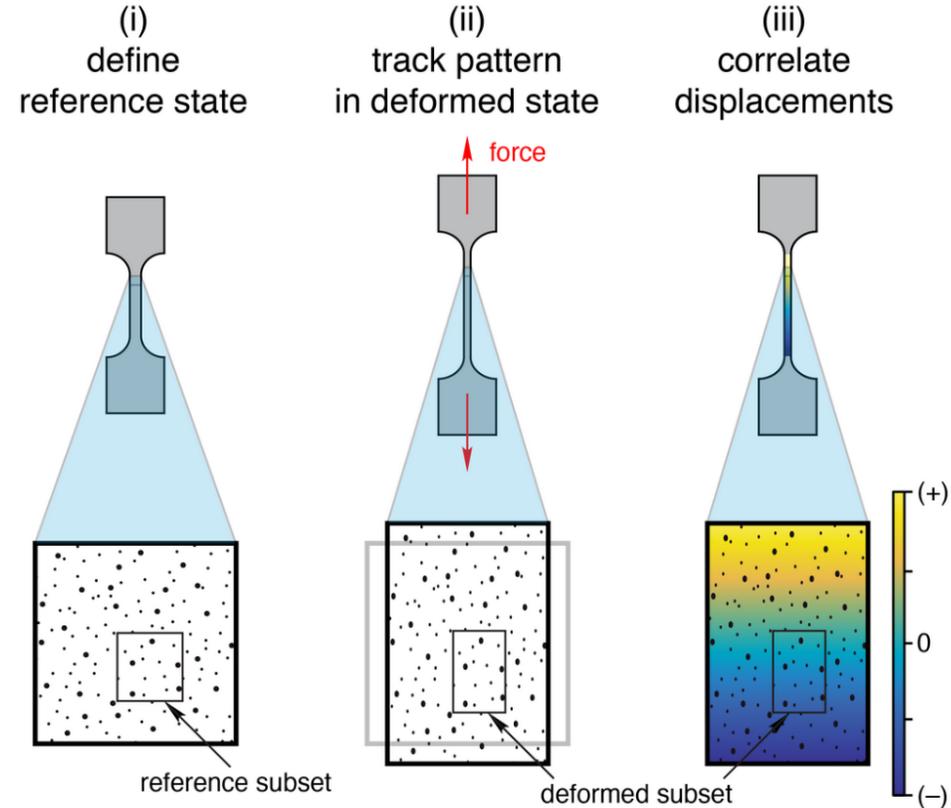
CONTEXTE

- **Évolution des procédés de fabrication** : matériaux difficile à caractériser par des approches classiques
- Nécessité de progresser dans les **méthodes d'analyses**
- Nécessité de **raccourcir et fiabiliser le cycle de développement** des produits



CONTEXTE

- Nouvelles méthode et nouveaux moyens d'acquisitions : **tomographie in-situ**
- Nouvelles méthodes d'exploitation de données tomographiques : **Corrélation d'Image Volumique (DVC)**
 - Extension volumique de la Corrélation d'Image Numérique (DIC)



<https://digitalimagecorrelation.org/>

CONTEXTE

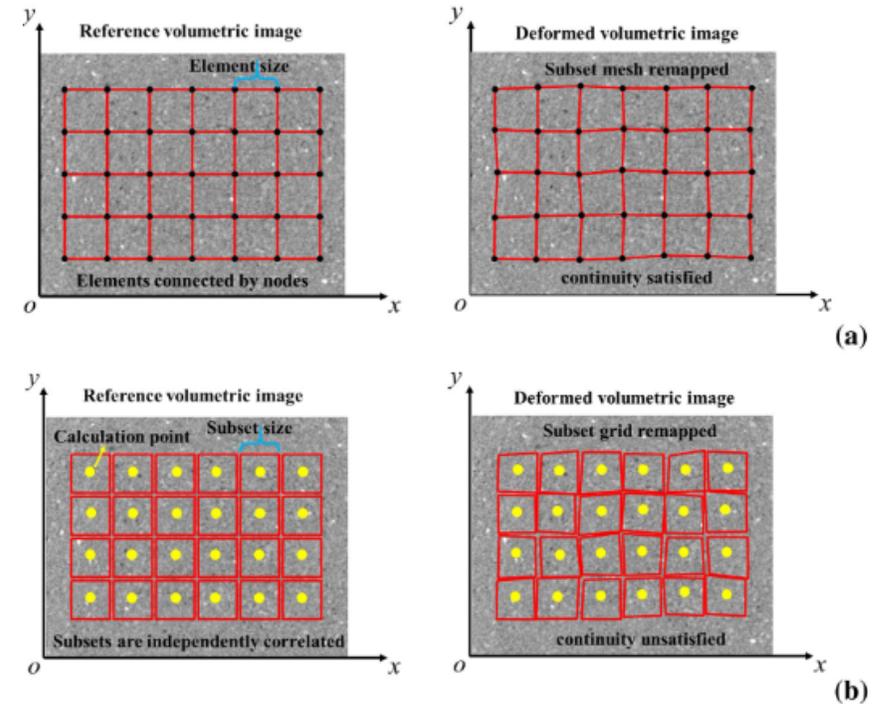
- Objectifs principaux
 - Appropriation des méthodologies d'analyse en **tomographie sous charge**
 - Optimisation de couplages **acquisition tomographique / corrélation volumique**
 - Intégration de **nouvelles méthodes de traitement** en tomographie RX
- Verrous scientifiques
 - **Influence des paramètres d'acquisitions** tomographiques sur l'analyse mécanique du comportement
 - **Analyse multi-échelle** et continuité des résultats
 - Méthodologie de **couplage essais/calculs** pour l'optimisation des lois de comportement matériaux
 - **Identification et analyse des sources d'incertitudes** sur les valeurs cinématiques calculées par corrélation (déplacements, déformations)

SOMMAIRE

- Principe de la Corrélacion d'Image Volumique (DVC)
- Méthode d'évaluation de l'erreur systématique de corrélation
- Résultats et comparaison
- Conclusions et perspectives

PRINCIPE DE LA CORRÉLATION D'IMAGES VOLUMIQUES (DVC)

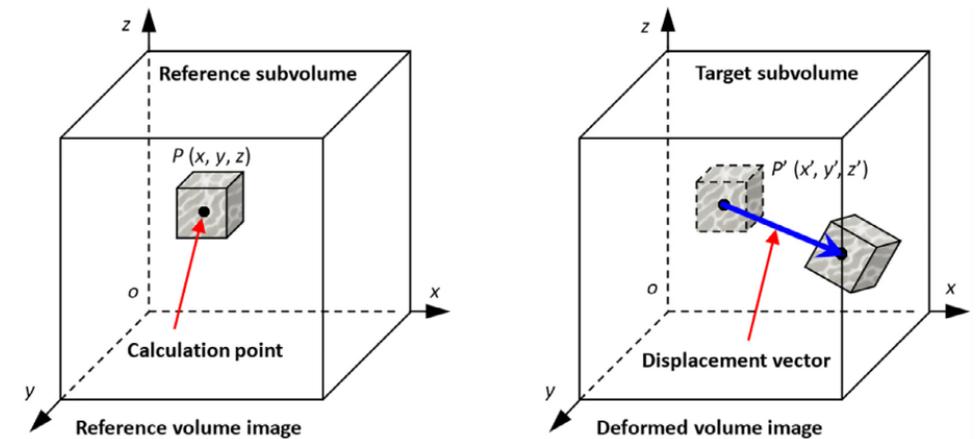
- Extension volumique de la corrélation 2D
- **Discrétisation des volumes** : construction d'une grille 3D
 - (a) : méthode globale
 - (b) : méthode locale



Mao, L., Liu, H., Lei, Y. et al. Evaluation of Global and Local Digital Volume Correlation for Measuring 3D Deformation in Rocks. *Rock Mech Rock Eng* 54, 4949–4964 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02517-9>

PRINCIPE DE LA CORRÉLATION D'IMAGES VOLUMIQUE (DVC)

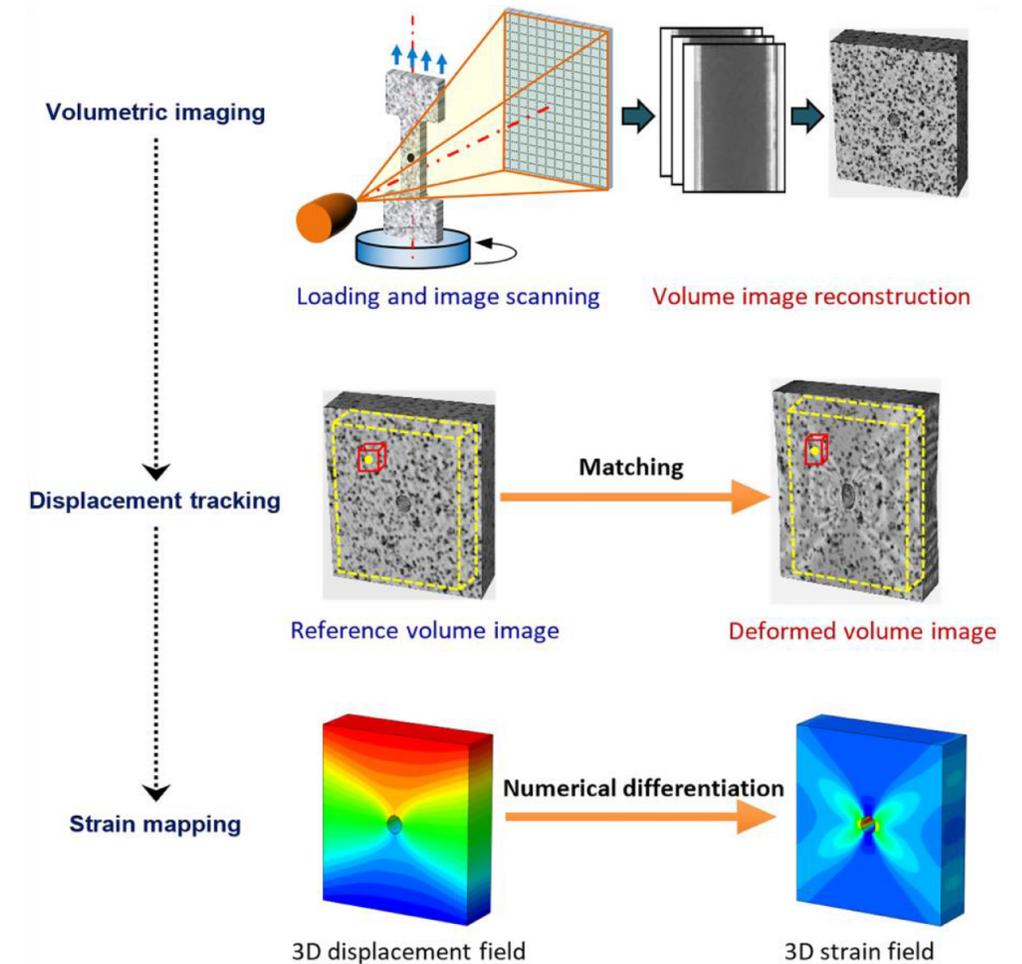
- Extension volumique de la corrélation 2D
- **Discrétisation des volumes** : construction d'une grille 3D
 - (a) : méthode globale
 - (b) : méthode locale
- Déplacements recherchés entre un **état initial** et un **état déformé** : **cartographie des déplacements et déformations**



Pan, B., & Wang, B. (2020). Some recent advances in digital volume correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 135, 106189. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106189>

PRINCIPE DE LA CORRÉLATION D'IMAGES VOLUMIQUE (DVC)

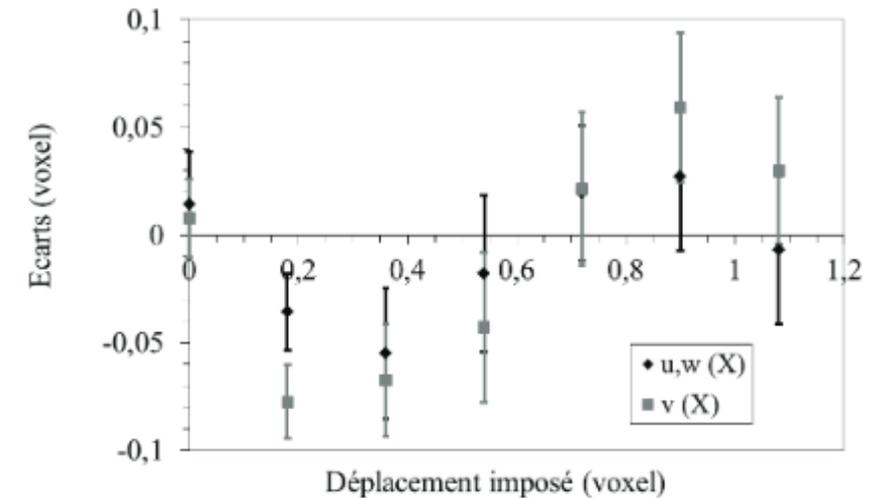
- Extension volumique de la corrélation 2D
- **Discrétisation des volumes** : construction d'une grille 3D
 - (a) : méthode globale
 - (b) : méthode locale
- Déplacements recherchés entre un **état initial** et un **état déformé** : **cartographie des déplacements et déformations**
- Corrélation effectuée à partir des **niveaux de gris** de chaque voxels
 - Nécessité d'avoir une large plage niveau de gris : matériaux hétérogènes
 - Nécessité d'avoir la meilleure qualité d'image possible
- Précision correspondant à la taille du voxel : **insuffisant**
- Précision supérieure atteignable par **interpolation des niveaux de gris**



Pan, B., & Wang, B. (2020). Some recent advances in digital volume correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 135, 106189. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106189>

PRINCIPE DE LA CORRÉLATION D'IMAGES VOLUMIQUE (DVC)

- Précision sub-voxellique atteignable par **interpolation des niveaux de gris**
- Différentes fonctions d'interpolations
 - **Polynomiale**, spline, etc...
- **L'évolution de l'erreur de mesure est fonction de la résolution de mesure** ⁽¹⁾
 - Erreur systématique (biais) sinusoïdale de période 1 voxel
- Permet de conditionner la **précision maximale** atteignable par corrélation
- À identifier avant chaque nouvel essai



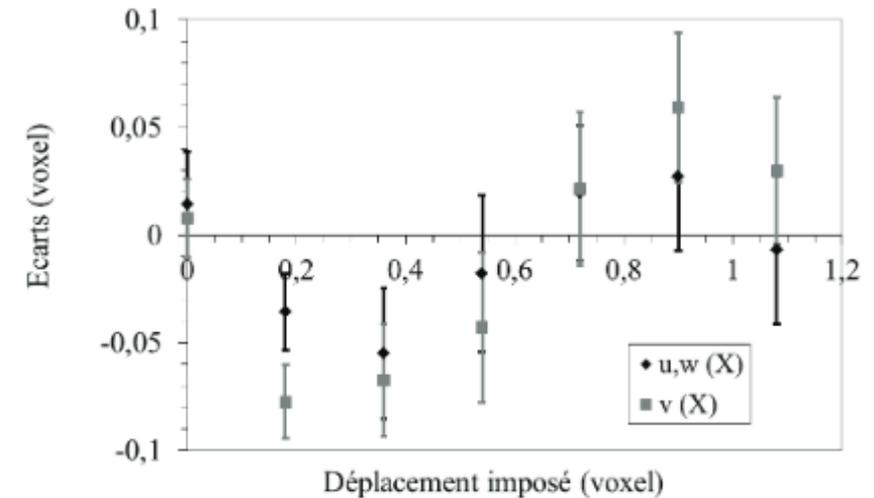
ÉVALUATION DE L'ERREUR SYSTÉMATIQUE

■ Principe de la méthode classique de translation

- Application d'une transformation mécanique maîtrisée d'amplitude < 1 voxel
- Solution la plus efficace et la plus fiable : **déplacement de corps rigide**
- Erreur systématique définie par :

$$E_s = U_{imp} - \frac{1}{n} \left(\sum_1^n |U_{mes}| \right)$$

- E_s : erreur systématique
 - U_{imp} : déplacement imposé à chaque incrément
 - U_{mes} : moyenne des déplacements obtenus par corrélation
 - n : nombre de points de la grille de corrélation
- ## ■ Limites de la méthode
- **Incertitudes** liés à la platine de translation micrométrique
 - **Temps nécessaire** pour tracer la courbe
 - 1 acquisition = 1 point sur la courbe
 - Proposition d'une méthode plus optimisée et plus performante



Temps d'acquisition : environ 10h

ÉVALUATION DE L'ERREUR SYSTÉMATIQUE

- Nouvelle méthode proposée : rotation appliquée à l'échantillon
 - 1^{ère} acquisition à l'état de référence
 - **Rotation appliquée** pour garantir **au moins 1 voxel de déplacement** à chaque extrémité
 - 2^{ème} acquisition après la rotation

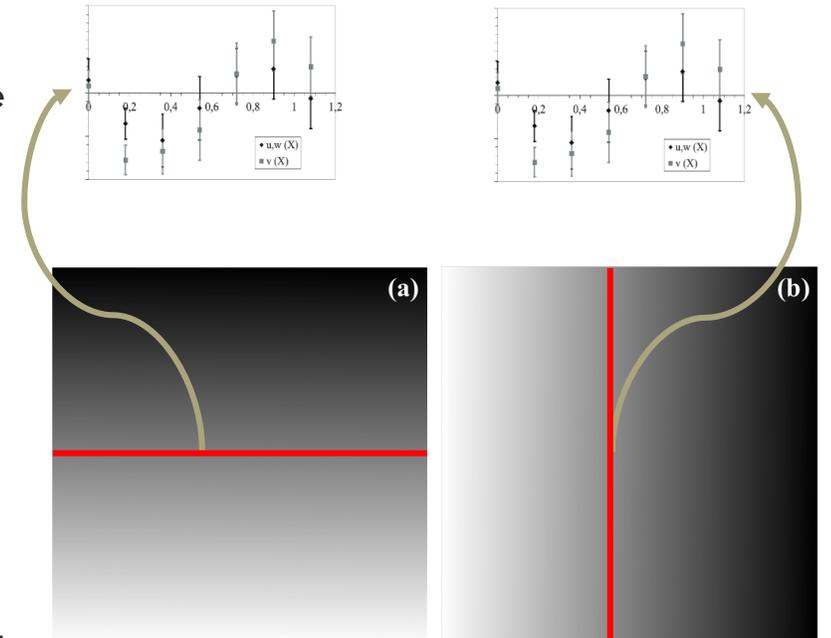
- Erreur systématique définie par :

$$E_s = U_{imp} - U_{mes}$$

- E_s : erreur systématique
- U_{imp} : déplacement imposé en chaque point
- U_{mes} : déplacements obtenus par corrélation en chaque point
- **Possibilité de tracer une courbe en S pour chaque ligne (ou colonne) d'un gradient**

- Méthodologie

- Vérification numérique 2D/3D : comparaison méthode classique/nouvelle méthode
- Vérification expérimentale 2D/3D : comparaison méthode classique/nouvelle méthode

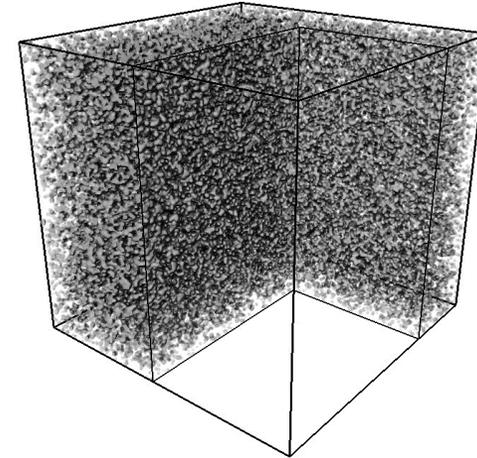
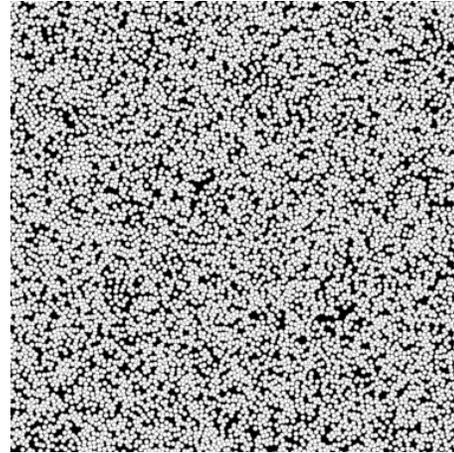


Gradients de déplacement obtenus par corrélation suivant l'axe x (a) et y (b)

ÉTUDE NUMÉRIQUE

■ Mouchetis

- Intensité de chaque grain défini par une fonction cosinus



Mouchetis utilisé pour l'étude 2D (200 x 200 pixels) et 3D (200 x 200 x 200) voxels

■ Déplacements appliqués

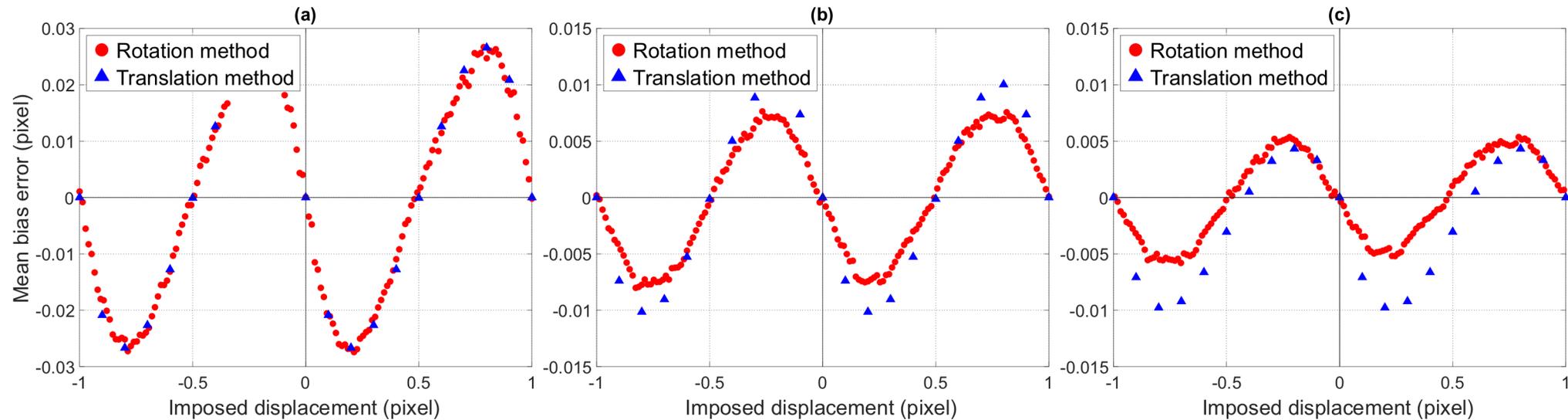
- Méthode de translation : 20 translations de 0,1 pixels
- Nouvelle méthode : rotation suffisante pour avoir 1 pixel de déplacement à chaque extrémité
- Corrélation effectuée avec X-CORREL⁽¹⁾ et X-DVCORREL⁽²⁾
 - Fenêtre de corrélation : 32 x 32 pixels
 - Zone de recherche de 2 pixels
 - Fonction d'interpolation : bilinéaire, bicubique et biquintique (2D) / Trilinéaire et tricubique (3D)

(1) Valery Valle, S. Hedan, P. Cosenza, A.L. Fauchille, M. Berdjane. Digital Image Correlation Development for the Study of Materials Including Multiple Crossing Cracks. *Experimental Mechanics*, 2015, 55 (2), pp.379-391. <10.1007/s11340-014-9948-1>. <hal-01269981>

(2) Valle, V.; Bokam, P.; Germaneau, A.; Hedan, S. (2018). *New Development of Digital Volume Correlation for the Study of Fractured Materials*. *Experimental Mechanics*, (), -. doi:10.1007/s11340-018-0415-2

ÉTUDE NUMÉRIQUE : RÉSULTATS

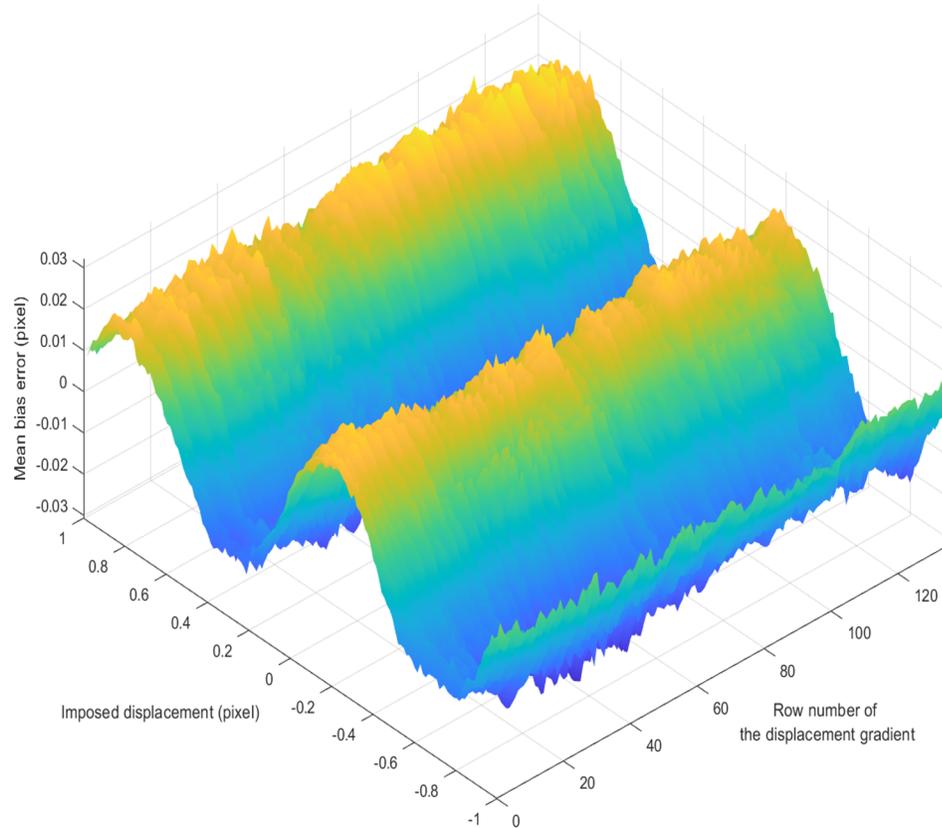
- Comparaison résultats 2D méthode classique / nouvelle méthode
 - (a) : interpolation bilinéaire (b) : interpolation bicubique (c) : interpolation biquintique



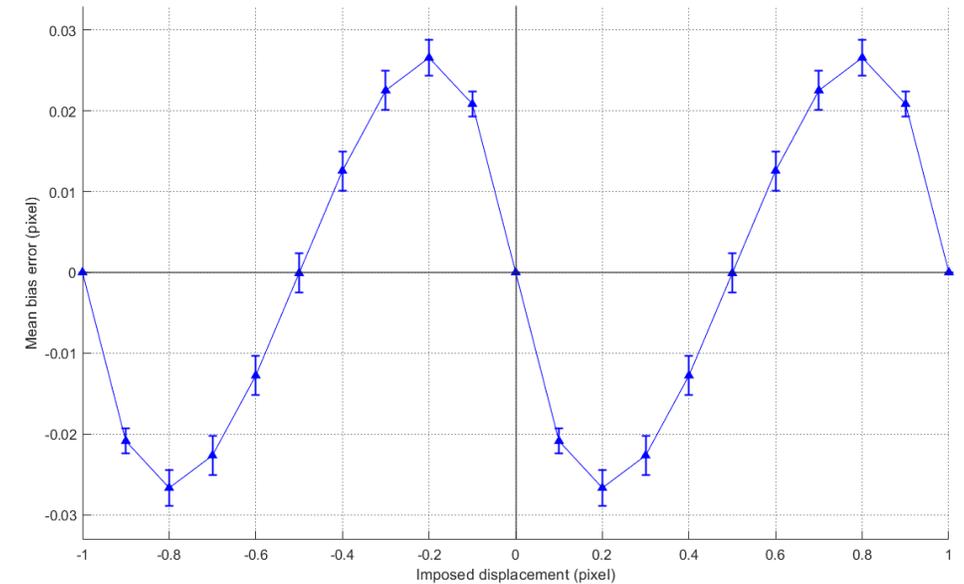
- L'erreur systématique diminue avec le degré d'interpolation
- **Résultats cohérents** avec la méthode en translation
- Résultats de la méthode en rotation : **moyenne des courbes en S** sur l'ensemble des lignes du gradient $D_p X$

ÉTUDE NUMÉRIQUE : RÉSULTATS

- Mapping de l'erreur systématique sur l'ensemble de la zone de corrélation



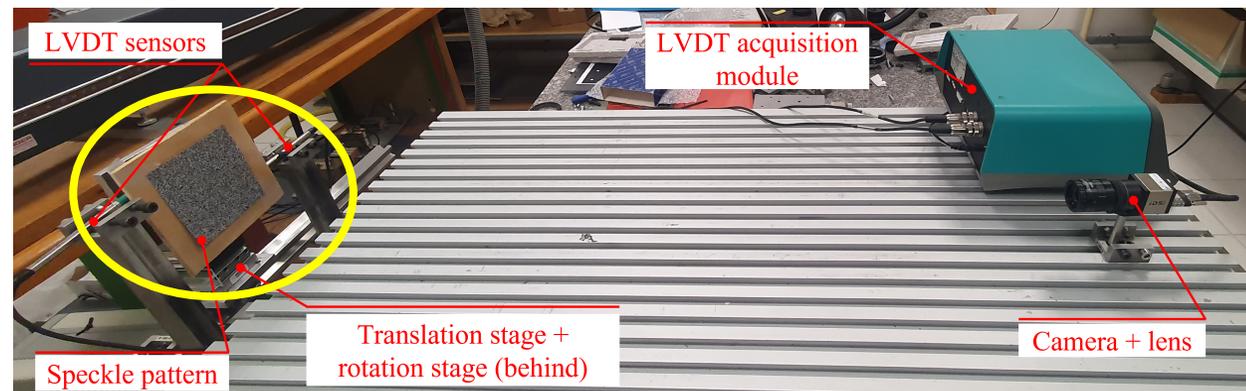
- + 15 000 points de résultats
- 2 acquisitions (2h)



- 20 points de résultats
- 20 acquisitions (20h)

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE 2D

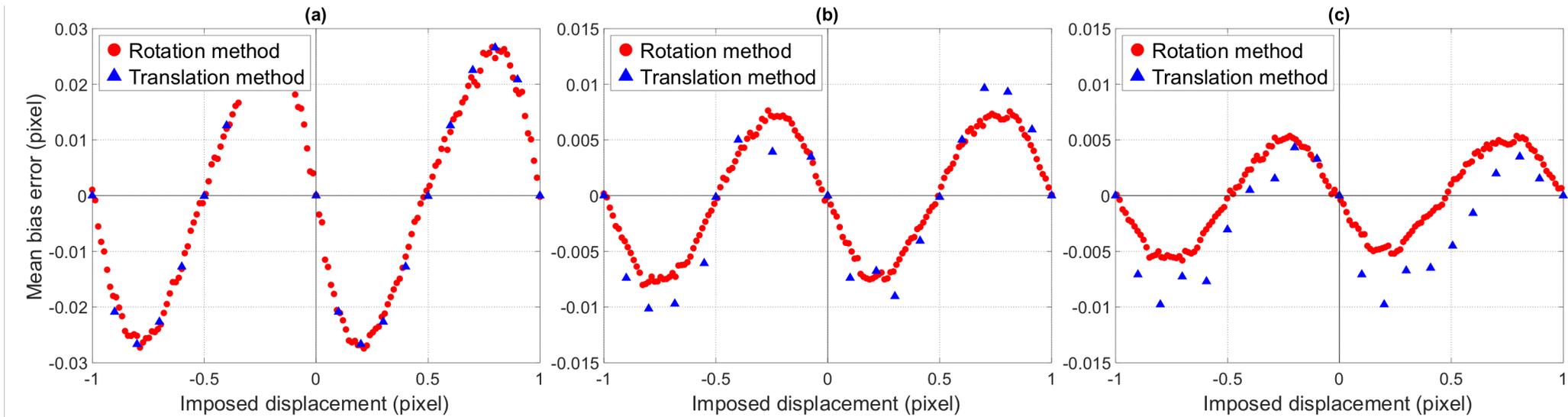
- Banc d'essai 2D
 - Caméra IDS MicroEye UI-1240SE, 1280x1024 pixels (5,3 $\mu\text{m}/\text{px}$)
 - Longueur focale : 24mm
 - Déplacements contrôlés par LVDT
- Déplacements appliqués
 - Méthode de translation : 20 translations de 0,1 pixels
 - Nouvelle méthode : rotation suffisante pour avoir 1 pixel de déplacement à chaque extrémité
- Corrélation effectuée avec logiciel X-CORREL⁽¹⁾
 - Fenêtre de corrélation : 32 x 32 pixels
 - Zone de recherche de 2 pixels
 - Fonction d'interpolation : bilinéaire, bicubique et biquintique



ÉTUDE EXPÉRIMENTALE 2D : RÉSULTATS

■ Comparaison résultats 2D méthode classique / nouvelle méthode

- (a) : interpolation bilinéaire (b) : interpolation bicubique (c) : interpolation biquintique

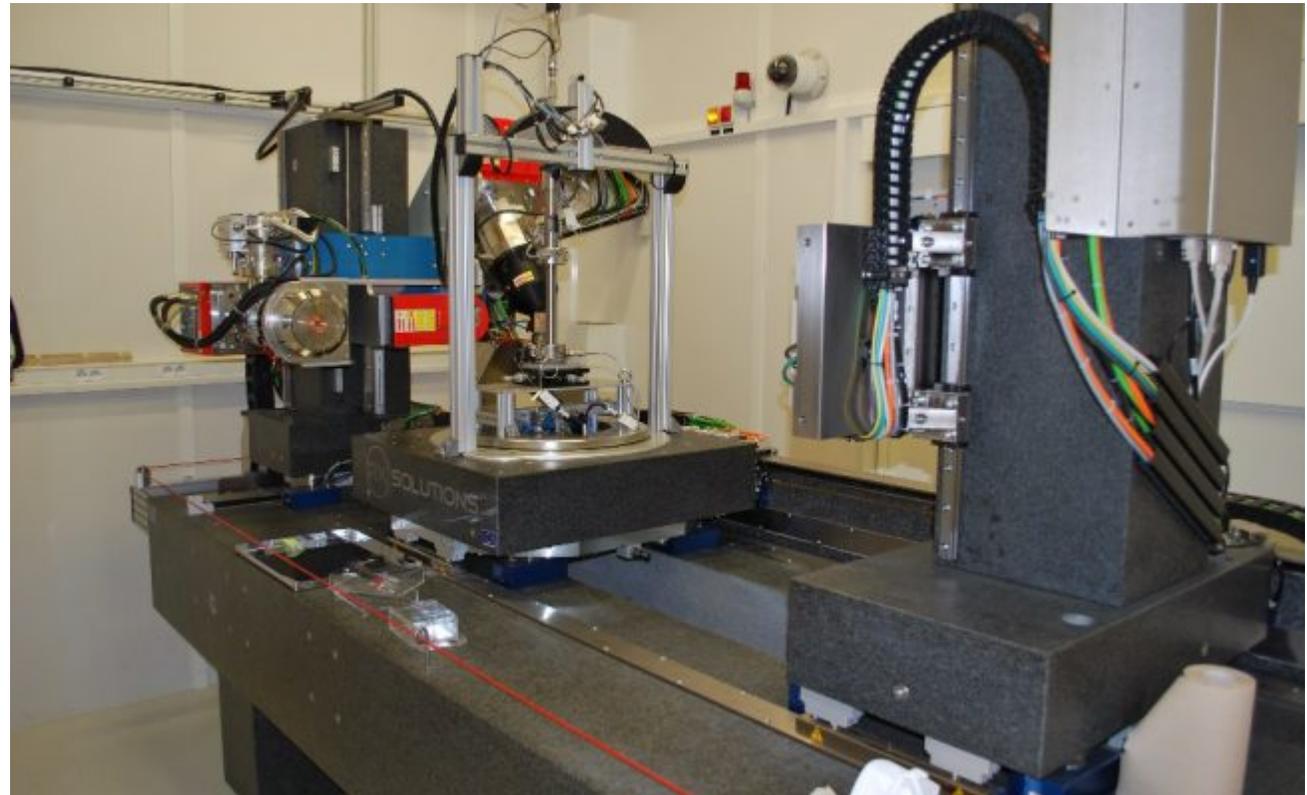


- L'erreur systématique diminue avec le degré d'interpolation
- Résultats cohérents avec la méthode en translation
- Résultats de la méthode en rotation : moyenne des courbes en S sur l'ensemble des lignes du gradient

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE 3D

■ Tomographe

- UltraTom de RX Solutions, source RX de Hamamatsu (150kV, 75W) et capteur plan Paxscan (1840 x 1456 px, 127 μm pixel pitch)
- Tension : 60kV
- Puissance : 4W
- Vitesse imageur : 4 images/seconde
- Moyennage projections : 10
- Nombre de projections : 1920
- Anti ring-shift activé
- Correction dérive du spot activée
- Reconstruction : FDK, filtre Tukey
- **Résolution d'acquisition : 12 μm**



Micro-tomographe de l'ENSMA

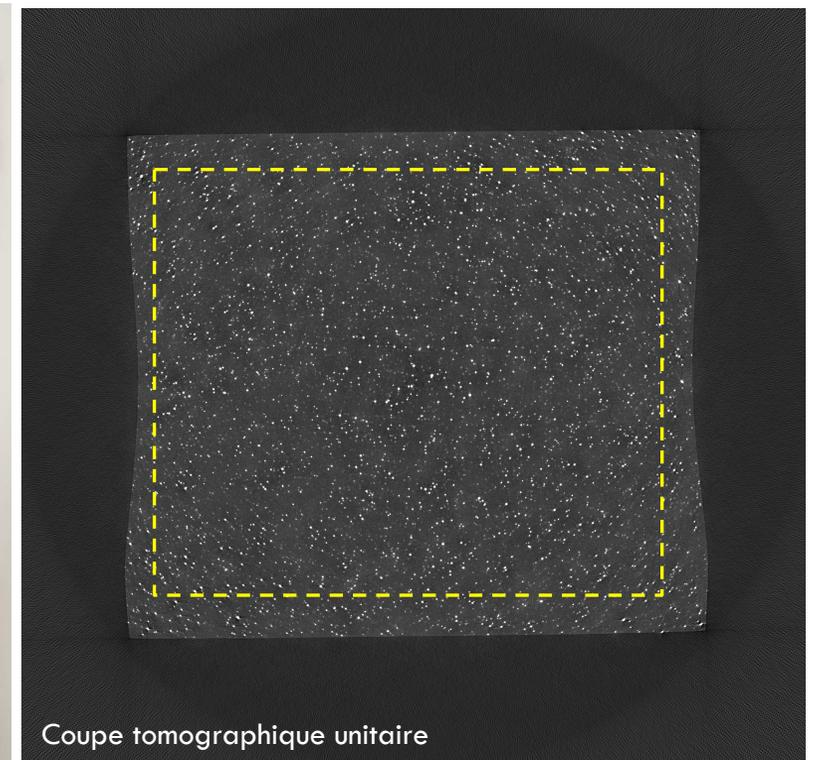
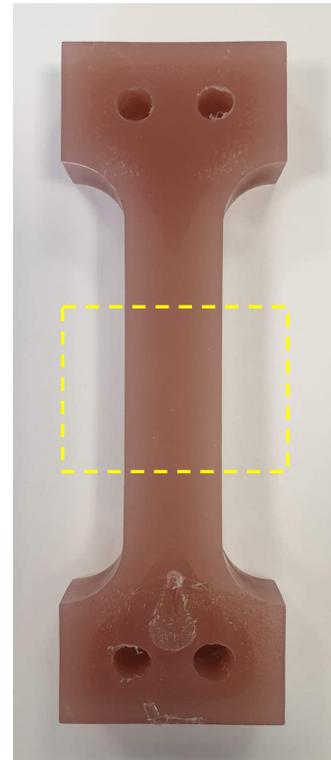
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE 3D

■ Tomographe

- UltraTom de RX Solutions, source RX de Hamamatsu (150kV, 75W) et capteur plan Paxscan (1840 x 1456 px, 127 μm pixel pitch)
- Tension : 60kV
- Puissance : 4W
- Vitesse imageur : 4 images/seconde
- Moyennage projections : 10
- Nombre de projections : 1920
- Anti ring-shift activé
- Correction dérive du spot activée
- Reconstruction : FDK, filtre Tukey
- **Résolution d'acquisition : 12 μm**

■ Éprouvette

- Polypropylène chargé en particules de cuivre ($\sim 50 \mu\text{m}$)



Coupe tomographique unitaire

Zone de scan de l'éprouvette (gauche) et zone de corrélation (droite)

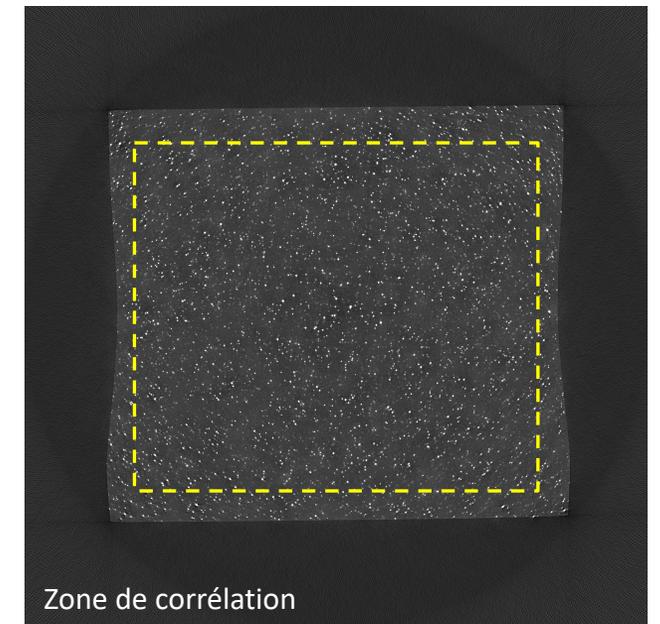
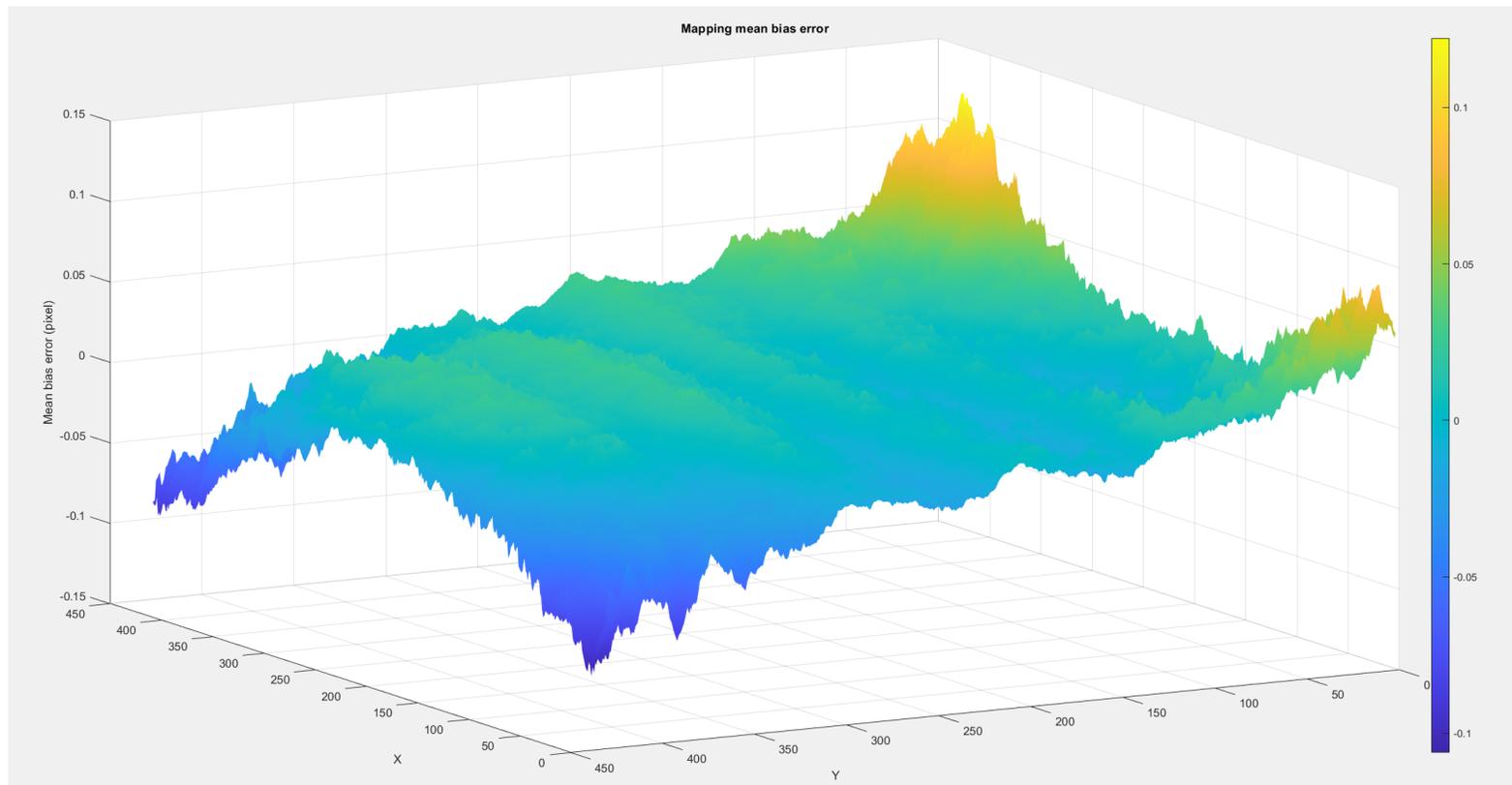
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE 3D : RÉSULTATS

- Déplacements appliqués
 - Méthode de translation : 10 translations de 0,1 voxel
 - Nouvelle méthode : rotation suffisante pour avoir 1 pixel de déplacement à chaque extrémité
- Corrélation effectuée avec X-DVCORREL
 - Fenêtre de corrélation : 32 x 32 x 32 pixels
 - Zone de recherche de 2 pixels
 - Fonction d'interpolation : trilinéaire et tricubique
- Résultats de la méthode classique de translation
 - **Impossible d'obtenir une courbe en S à 12 μm de résolution**
 - Impact de l'**anti ring-shift** et de la correction de la **dérive du spot**
 - Résultats de 2 repeat scans :

Anti ring-shift activé	DpX (voxel)	DpY (voxel)	DpZ (voxel)
Avec correction dérive spot	-1,187	1,281	0,708
Sans correction dérive spot	-1,511	1,862	0,224
Anti ring-shift désactivé	DpX	DpY	DpZ
Avec correction dérive spot	0,0839	0,15	0,059
Sans correction dérive spot	0,0119	0,04	-0,043

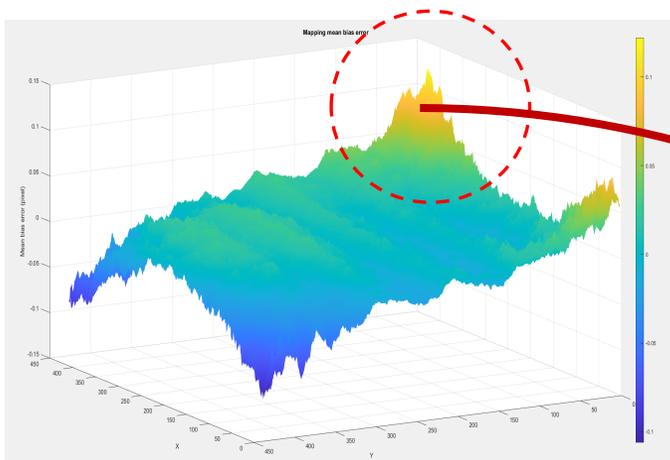
RÉSULTATS : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE 3D

- Résultats de la méthode en rotation
 - Environ **130M de points** calculés
 - **Moyenne** de l'ensemble des cartographies de déplacement **sur la hauteur de l'échantillon**



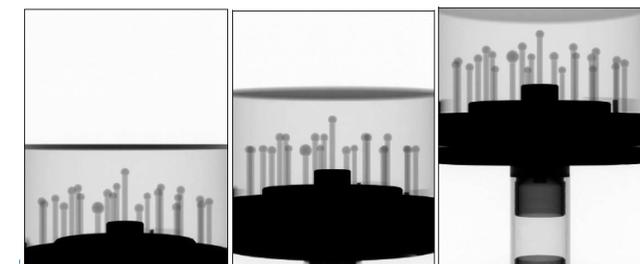
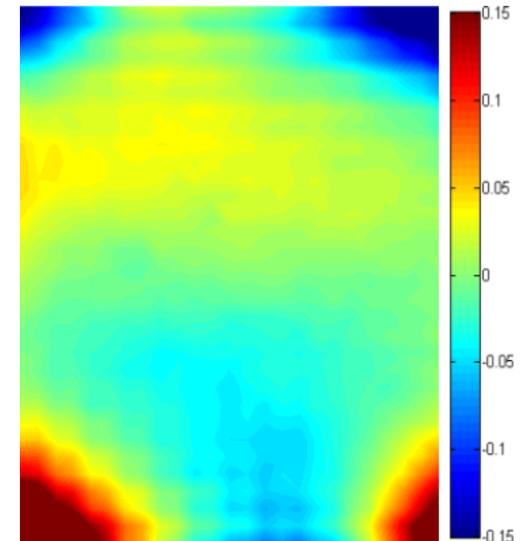
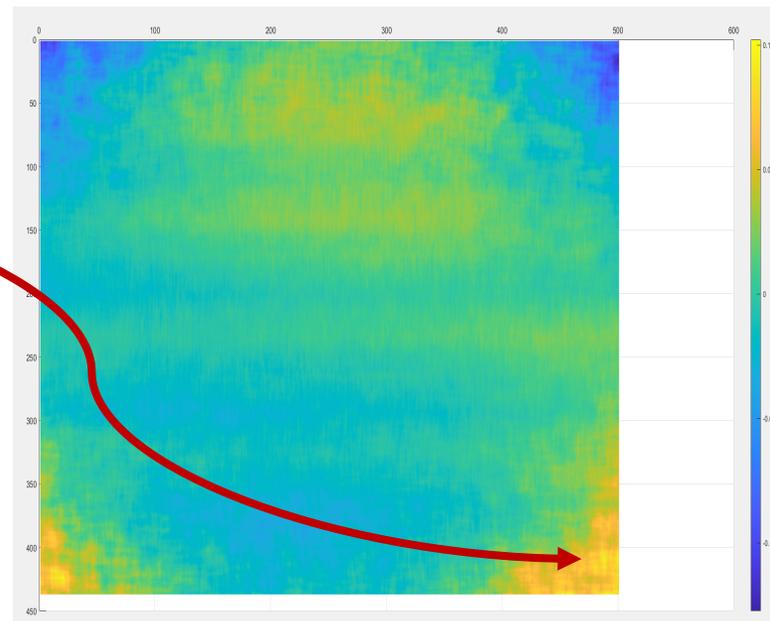
APPORT COMPLÉMENTAIRE

- La corrélation volumique permet de **caractériser les distorsions** générées par le capteur plan utilisé
 - Seulement deux acquisitions nécessaires
 - Pas nécessaire d'utiliser une pièce étalon, simplement une pièce avec une texture interne
 - Caractérisation des incertitudes en tomographies



Résultats obtenus par corrélation volumique + mouvement de rotation

- 1M de points de résultats (moyenne)
- 2 acquisitions



- 21 points de résultats (billes)
- 3 acquisitions minimum

Résultats de Weiss et al. (2012)⁽¹⁾

(1) Weiß, D., Lonardonì, R., Deffner, A., & Kuhn, C. (2012). Geometric image distortion in flat-panel X-ray detectors and its influence on the accuracy of CT-based dimensional measurements. 4th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT), 19-21 September 2012, Wels, 21

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- **Avantages principaux de la méthode de rotation**
 - Nombre de points décorrélés du nombre d'acquisitions effectuées
 - Peu sensible aux erreurs de déplacement imposé et corrections parasites
 - Temps d'acquisition fortement réduit par rapport à la méthode de translation
- **Perspectives travaux de recherche**
 - Optimisation d'un système de chargement polyvalent in-situ en tomographie RX
 - Essais avec matériau sous charge + analyse des erreurs DVC
 - Validation en couplage essais/calculs
 - Influence paramètres d'acquisitions sur l'analyse du comportement mécanique
 - Analyse des résultats en multi-échelle
- **Perspectives pour la thèse**
 - Finalisation d'un article présentant la nouvelle méthode de caractérisation des erreurs en rotation
 - Deuxième article en perspective sur la caractérisation de la distorsion des détecteurs par DVC
 - Congrès international prévu en 2023