



HAL
open science

Mesure de grandeurs cinématiques tridimensionnelles par tomographie optique à balayage et tomographie-PIV

Arnaud Germaneau, Pascal Doumalin, Patrick Braud, Jean-Christophe
Dupré, Lionel Thomas

► To cite this version:

Arnaud Germaneau, Pascal Doumalin, Patrick Braud, Jean-Christophe Dupré, Lionel Thomas.
Mesure de grandeurs cinématiques tridimensionnelles par tomographie optique à balayage et
tomographie-PIV. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France.
hal-03391286

HAL Id: hal-03391286

<https://hal.science/hal-03391286>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mesure de grandeurs cinématiques tridimensionnelles par tomographie optique à balayage et tomographie par reconstruction algébrique

A. GERMANEAU^a, P. DOUMALIN^a, J.-C. DUPRE^a,
B. TREMBLAIS^b, L. THOMAS^c, V. GRULIER^c, P. BRAUD^c, L. DAVID^c

a. LMS UMR 6610 CNRS – Université de Poitiers, Bd M. et P. Curie, 86960 Futuroscope Chasseneuil

b. X-LIM-SIC UMR 6172 CNRS – Université de Poitiers, Bd M. et P. Curie, 86960 Futuroscope Chasseneuil

c. LEA UMR 6609 CNRS – Université de Poitiers, Bd M. et P. Curie, 86960 Futuroscope Chasseneuil

Résumé :

Ce travail, réalisé dans le cadre du projet ANR 'VIVE3D', consiste à développer de nouvelles techniques pour étudier les effets mécaniques tridimensionnels dans les matériaux solides transparents et dans les fluides. Pour cela, la tomographie par reconstruction algébrique d'une part et la tomographie optique par balayage d'autre part ont été mises en œuvre. Une confrontation de ces techniques est réalisée pour la mesure de champs de déplacement 3D lors d'essais de translation sur des blocs solides transparents.

Abstract :

This work, made in the framework of an ANR project, is about the development of new techniques for the 3D measurement of mechanical data in transparent solid and fluid materials. A comparison of two techniques, optical slicing tomography and algebraic reconstruction tomography method, is performed with 3D displacement tests of transparent solids.

Mots clefs : tomographie, balayage laser, corrélation volumique, déplacements 3D

1 Introduction

Ce travail porte sur le développement de techniques de mesure de champs volumiques de déplacement 3D dans le but d'étudier des effets mécaniques tridimensionnels dans des matériaux transparents solides ou fluides. Pour cela, deux techniques d'acquisition d'images volumiques ont été mises en œuvre : la tomographie par balayage laser [1] et la tomographie par reconstruction algébrique [2]. Ces deux techniques sont basées sur la diffusion de la lumière par des marqueurs aléatoirement répartis dans le matériau transparent. La tomographie par balayage laser est basée sur le découpage optique à partir d'un faisceau laser plan très fin. Deux variantes sont envisagées : le déplacement de la pièce ou du faisceau laser. La tomographie par reconstruction utilise une nappe laser épaisse fixe et plusieurs capteurs enregistrant la même scène. Ce papier expose le principe retenu de chaque technique ainsi que les premiers résultats de leur mise en œuvre.

2 Tomographie par balayage

La tomographie par balayage laser consiste à effectuer un découpage optique suivi d'un balayage de la pièce transparente avec un faisceau laser plan. Le dispositif optique est constitué d'une source laser, d'une lentille convergente et d'une lentille cylindrique qui vont former un plan laser (figure 1). La tomographie par balayage laser permet d'acquérir des coupes correspondant à des images 2D de la lumière diffusée à l'intérieur de l'échantillon étudié. Les images 2D sont acquises avec une caméra CCD placée perpendiculairement à la direction du faisceau plan laser. Le balayage de l'échantillon est effectué en déplaçant soit le laser soit la pièce avec une table de translation micrométrique pilotée à l'aide d'un PC. Ce processus automatique permet d'enregistrer une image de la section illuminée par le plan laser à chaque incrémentation imposée. La succession des images de coupes permet de construire l'image volumique

(figure 2). Pour obtenir des voxels cubiques dans l'image volumique, la résolution spatiale de la caméra CCD (résolution dans le plan x-y) doit être égale au pas imposé entre deux coupes successives dans la direction z. De plus, l'épaisseur du plan laser doit aussi être égale au pas imposé entre deux coupes successives pour garantir un taux de remplissage du voxel égal à 1.

Deux types de balayage sont envisagés : laser fixe et pièce mobile ou pièce fixe et laser mobile. Les dimensions apparentes des objets sont fonction de la focale de l'objectif, de la distance d'observation, de l'indice optique du matériau, de la distance parcourue par les faisceaux diffusés dans et hors de la pièce. La figure 3 présente des coupes d'images volumiques et montre que les deux techniques donnent des images assez semblables. De manière quantitative, la figure 4 montre que la première solution (pièce mobile) donne le moins de distorsion en fonction de la profondeur. Cette solution est celle qui est employée en mécanique des solides pour des études statiques sur des structures. Pour l'étude d'écoulement, cette solution n'est pas possible, seul un balayage du laser est envisageable. Dans ce cas pour les volumes étudiés ici dont la profondeur est d'environ 10 mm, les écarts restent, tout de même, faibles (inférieurs à 1%) et peuvent être négligés.

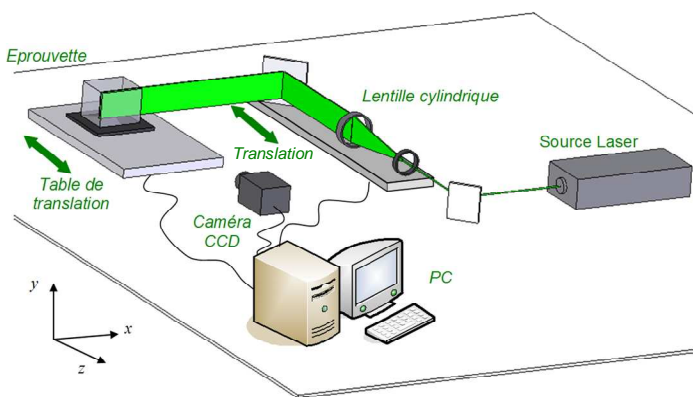


FIG. 1 : Tomographie par balayage

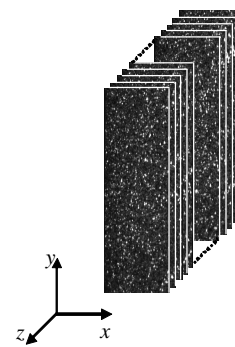


FIG. 2 : Image volumique

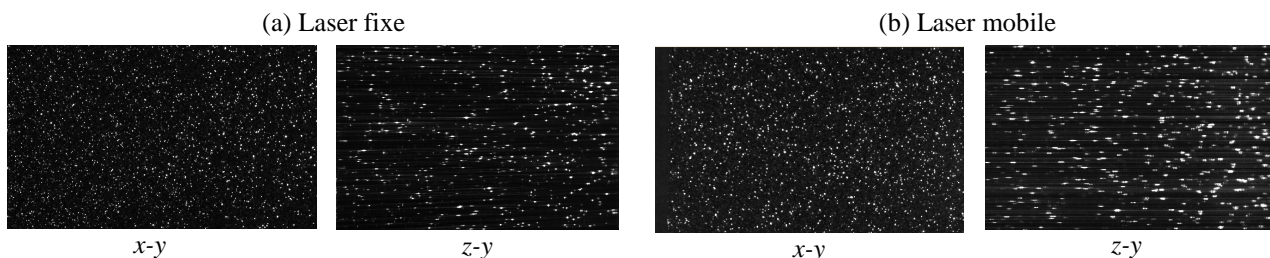


FIG. 3 : Visualisation de coupes dans des images volumiques acquises par balayage avec laser fixe (a) et laser mobile (b)

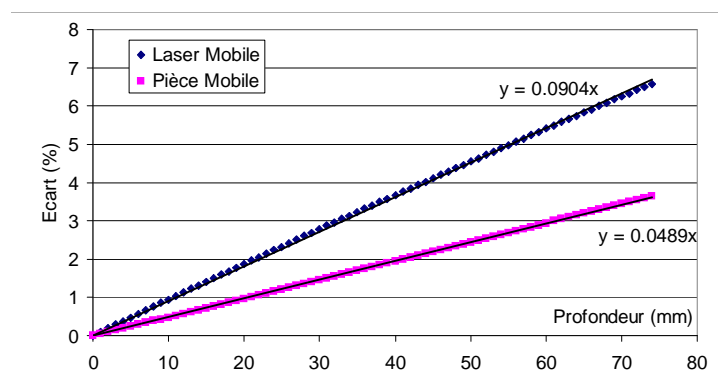


FIG. 4 : Variation apparente des dimensions dans le plan x-y de l'objet étudié en fonction du type de balayage et du plan visualisé.

3 Tomographie par reconstruction

Actuellement les techniques les plus utilisées en tomographie pour la reconstruction volumique en mécanique des fluides sont les techniques de reconstruction algébrique de type ART (Algebraic Reconstruction Technique) [3] ou MART (Multiplicative ART) [3]. En effet, ces méthodes sont bien adaptées pour reconstruire un volume à partir d'un nombre très limité de vues (2 à 6). Le problème de reconstruction peut s'écrire comme un système linéaire d'équations puisque la contribution des intensités des voxels du volume aux intensités des pixels des vues est donnée par $W.X = Y$ où Y et X sont respectivement le vecteur intensité des pixels et le vecteur intensité des voxels. W est appelée matrice de poids ou d'influence. La ligne p de W représente un rayon de projection sur le pixel p mettant en jeu les voxels v du volume au voisinage de ce rayon :

$$\sum_v w_{pv} X_v = Y_p$$

où Y_p est l'intensité du pixel p , X_v est l'intensité du voxel v , $p = 1, \dots, N_p$ avec N_p le nombre de pixels et $v = 1, \dots, N_v$ avec N_v le nombre de voxels. Le coefficient w_{pv} caractérise le poids du voxel v sur le pixel p .

Les coefficients d'interaction pixel-voxel w_{ij} sont calculés à partir d'une étape préliminaire qui est la calibration des caméras. La calibration donne les lignes de vue ou rayons de projection associées à chaque pixel des caméras. Nous calculons les coefficients de la manière suivante : si la ligne de vue du pixel i intercepte le voxel j alors la matrice de poids prend une valeur unitaire à la croisée de la ligne i et de la colonne j . Inversement si elle n'intercepte pas le voxel alors le coefficient w_{ij} reste nul (figure 5).

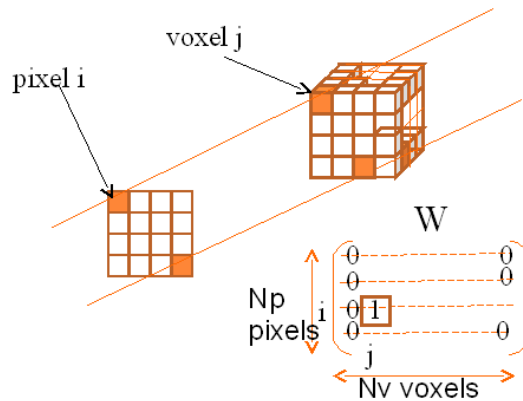


FIG. 5 : Construction de la matrice d'influence à partir des lignes de projection.

Les méthodes algébriques consistent à minimiser la fonctionnelle $J(X) = \|Y - WX\|^2$. La solution donnée étant l'argument minimum de J , c'est-à-dire la valeur de X pour laquelle J atteint son minimum.

Le système d'équations peut être scindé en plusieurs sous-systèmes ou blocs d'équations. Chaque bloc va alors contenir un ou plusieurs rayons de projection et donc une ou plusieurs équations linéaires du système. De manière générale les algorithmes ART sont des algorithmes itératifs qui correspondent à la méthode mathématique de Kaczmarz [4] pour la résolution d'un système linéaire d'équations.

L'algorithme MART s'appuie sur une actualisation multiplicative de l'intensité des voxels basée sur le rapport de l'intensité mesurée du pixel et de la projection des intensités des voxels obtenues à l'itération précédente :

$$X_v^{(k+1)} = X_v^{(k)} \left(\frac{Y_p}{\sum_j w_{pj} X_j^{(k)}} \right)^{\mu w_{pv}}$$

où μ est le coefficient de relaxation tel que $\mu \leq 1$. Une itération MART est complète lorsque tous les pixels p ont été considérés. Le coefficient de relaxation μ peut être optimisé pour une convergence plus rapide. Pour cette application, 4 caméras CCD sont employées, le bloc de particules est placé dans une cuve remplie de fluide d'indice pour supprimer les effets d'indice de réfraction lors des passages air, cuves, fluide, bloc (figure 6). Deux caméras CCD sont placées avec un angle de $\pm 45^\circ$ par rapport à Z dans un plan XZ et deux autres sont placées avec un angle de $\pm 20^\circ$ par rapport à Z dans un plan YZ . La cuve possède deux faces à 45° et un prisme, possédant un angle au sommet de 140° plaqué contre une de ses faces, qui permettent un enregistrement du bloc sans distorsion ou astigmatisme. La zone éclairée par un laser continu représente un volume de $90 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$. Les caméras sont calibrées en utilisant une mire en translation.

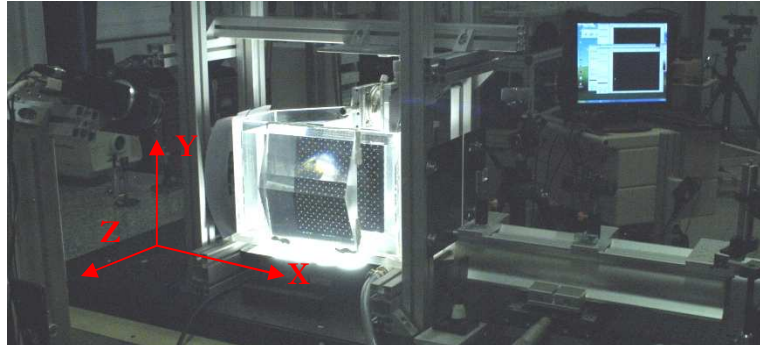


FIG. 6 : Montage expérimental de la cuve et des caméras lors de la calibration.

4 Corrélation volumique

La corrélation volumique est l'extension 3D de la corrélation d'images 2D qui est couramment utilisée pour la mesure des déplacements en surface. La corrélation volumique permet de mesurer le champ de déplacement entre deux états mécaniques au cœur de l'échantillon étudié. Le déplacement de chaque point d'une grille tridimensionnelle (définie à l'état initial) est calculé par corrélation des niveaux de gris des voxels au voisinage du point considéré défini par un sous-volume D appelé domaine de corrélation. En notant \underline{X} et \underline{x} les coordonnées d'un même point respectivement à l'état initial et à l'état déformé, on relie les deux configurations par une transformation matérielle 3D: $\underline{x} = \phi(\underline{X})$. Les meilleurs paramètres caractérisant cette transformation matérielle sont ceux qui minimisent un coefficient de corrélation C dont la formulation choisie est insensible aux variations de luminosité ou de contraste qui peuvent apparaître entre les deux images :

$$C = 1 - \frac{\sum_{\underline{x} \in D} (f(\underline{X}) - \bar{f}_D) \cdot (g(\phi(\underline{X})) - \bar{g}_D)}{\sqrt{\sum_{\underline{x} \in D} (f(\underline{X}) - \bar{f}_D)^2} \cdot \sqrt{\sum_{\underline{x} \in D} (g(\phi(\underline{X})) - \bar{g}_D)^2}}$$

où f et g sont les niveaux de gris des images respectivement à l'état initial et à l'état déformé, \bar{f}_D et \bar{g}_D sont leurs valeurs moyennes sur D et $\phi(D)$. Le calcul des variations des niveaux de gris entre deux voxels adjacents dans l'image déformée est effectué par une interpolation trilineaire, ce qui permet d'avoir une précision subvoxel sur la position finale du sous-volume. Celle-ci est obtenue par une procédure automatique de minimisation du premier gradient à partir d'une estimation au voxel près effectuée par un calcul systématique direct.

5 Mesures sur des blocs rigides

Afin d'évaluer les performances de chaque technique de tomographie, des essais sur des solides rigides sont envisagés. L'intérêt d'utiliser des blocs est de pouvoir imposer des déplacements connus avec de simples platines micrométriques de translation. La distribution 3D des niveaux de gris dans les images volumiques est donnée par la diffusion de la lumière qui est provoquée par les particules incorporées dans les blocs de résine transparente. Le choix des particules est donc prépondérant pour la suite de l'étude comme cela a été montré dans une étude précédente en mécanique des solides [5]. Pour ce travail nous avons étudié différents types de particules employées pour des applications solides et fluides. Le matériau choisi est une résine époxy qui permet de fabriquer des échantillons à la forme voulue par moulage. La figure 6 indique la forme et les dimensions des blocs et la zone analysée par tomographie. Le fait d'utiliser une résine de coulée permet d'inclure des particules au sein du matériau. Trois types de particules ont été employés :

Particules	Taille (μm)	Concentration en masse	
		Haute	Faible
Poudre de Silice (Si)	< 1	0.1%	0.01%
Microsphères de verre creuses recouvertes d'argent (mvcAg)	~ 15	0.002%	0.005%
Polyamide (PA)	~150	0.1%	0.02%

Tableau 1 : Types de particules

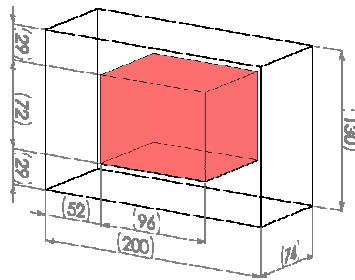


FIG. 7 : Dimensions (en mm) des blocs rigides

6 Résultats

Dans cette partie, on présente dans un premier temps l'influence du choix du type de balayage sur la précision de mesure d'un déplacement imposé et dans un second temps les premiers tests de reconstruction opérés sur des volumes simulés.

6.1 Comparaison des deux techniques de balayage

La corrélation volumique fournit une valeur du déplacement mesurée en chaque point d'une grille tridimensionnelle définie à l'intérieur de l'échantillon. Le déplacement est imposé par une table de translation micrométrique. Le déplacement est supposé être le même en chaque point du volume. Nous déterminons les écarts entre les valeurs mesurées et la valeur imposée pour les deux types de balayage. Pour chaque composante du déplacement, on calcule l'écart moyen qui correspond à l'erreur systématique et l'écart-type des écarts qui va donner l'incertitude de mesure égale à deux fois l'écart-type pour un niveau de confiance à 95%. Les premiers essais ont été réalisés sur la totalité de la profondeur (74 mm) sur un bloc en époxy ensemençé de particules de polyamide. La figure 8 représente l'erreur systématique et l'écart-type des écarts en fonction de l'intensité subvoxel du déplacement imposé. On retrouve une évolution sinusoïdale bien connue [5]. Les valeurs des écarts-types globaux sont synthétisées dans le tableau 2 pour la poudre de polyamide et les deux types de balayage, puis dans le tableau 3 pour trois types de poudre et déplacement du bloc. Ces résultats prouvent que la nature des particules a un plus grand effet sur la précision que le type de balayage.

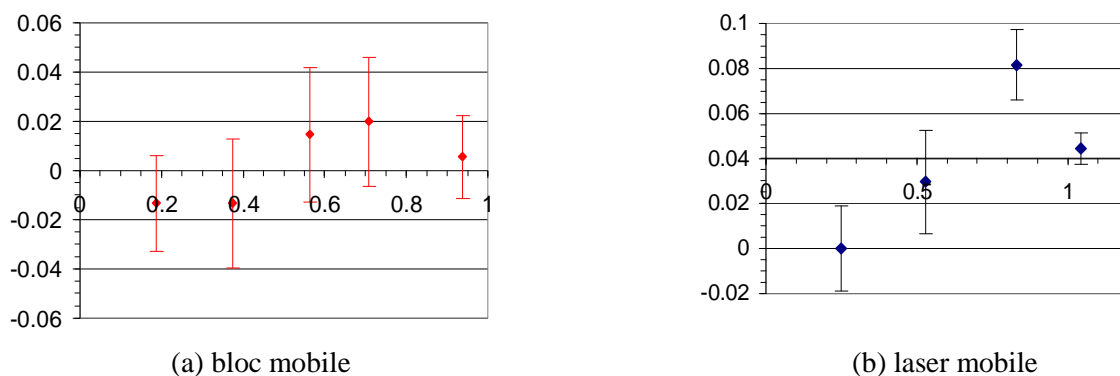


FIG. 8 : Ecarts sur les déplacements en fonction du déplacement imposé suivant x (voxel)

	U_x (vxl)	U_y (vxl)	U_z (vxl)
Bloc mobile	0.029	0.020	0.052
Laser mobile	0.034	0.019	0.058

Tableau 2 : Incertitudes de mesure en fonction de la technique de balayage employée

	U_x (vxl)	U_y (vxl)	U_z (vxl)
Si (faible conc.)	0.078	0.072	0.306
MvcAg (faible conc.)	0.037	0.031	0.072
PA (haute conc.)	0.029	0.020	0.052

Tableau 3 : Incertitudes de mesure en fonction du type de particules employé

6.2 Validation de l'algorithme de tomographie par reconstruction

Pour valider la procédure de tomographie par reconstruction algébrique, des images sont calculées par simulation en projetant géométriquement suivant trois directions un volume de 500 particules définies suivant une distribution gaussienne dans l'espace et dont les coordonnées sont connues. Ces images 200 par 200 pixels qui servent de données pour la reconstruction sont représentées sur la figure 9. Le résultat de la reconstruction est distribué suivant 200 par 200 par 50 voxels à partir de l'algorithme MART en prenant un coefficient $\mu=1$ et un nombre d'itérations de 4. Les cercles rouges (figure 9) représentent la position du centre des particules dans le volume de départ et les sphères représentent les particules du volume reconstruites. L'algorithme de reconstruction est validé puisque les particules reconstruites coïncident dans l'ensemble avec les particules du volume de départ. Nous notons cependant la présence d'un faible nombre de particules fantômes, c'est à dire des particules reconstruites qui ne correspondent pas à des particules existantes.

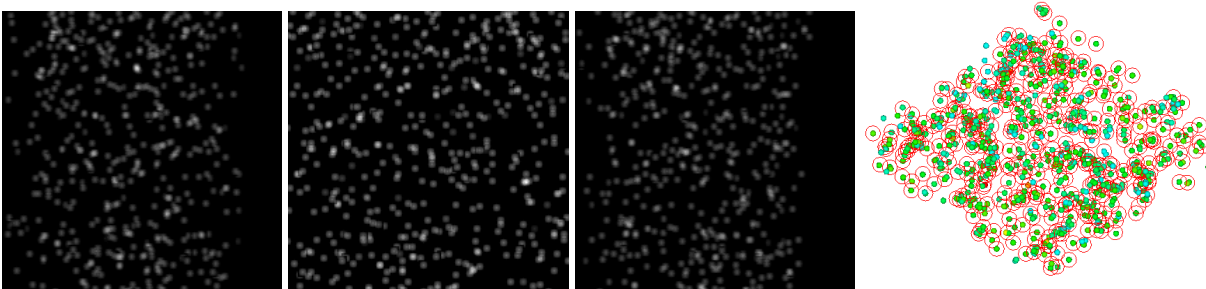


FIG. 9 : Images de 3 points de vue et volumes simulé (cercles rouges) et reconstruit (particules vertes)

7 Conclusion

Cette première étude nous a permis de montrer l'équivalence des deux types de balayage en terme de précision de mesure. Nous pourrions donc choisir indifféremment un balayage par laser ou un déplacement de la pièce. Pour les applications en mécanique des fluides, l'utilisation du balayage laser n'aura donc pas d'incidence sur les performances de la mesure par corrélation volumique. De plus, les premières simulations de reconstruction volumiques montrent la validité de l'algorithme choisi. L'étape suivante consiste à reconstruire des volumes réels correspondants à leurs homologues déjà obtenus par tomographie par balayage sur des blocs rigides. Ainsi une comparaison basée sur la précision de mesure des déplacements par corrélation volumique pourra être menée.

8 Remerciements

Nous tenons à remercier l'ANR qui nous permet de mener ces travaux à travers le projet VIVE3D.

References

- [1] Germaneau, A., Doumalin, P., Dupré, J.C., *Experimental Mechanics*, 47 (4), p. 523-532, 2007.
- [2] G. E. Elsinga, F. Scarano, B. Wieneke et B. W. van Oudheusden., 41(6) : 933-947, 2006..
- [3] R. Gordon, R. Bender et G.T. Herman. *Journal Theor. Biol.*, 29 : 471-481, 1970.
- [4] Kaczmarz S. *Angenäherte Auflösung von systemen linearer gleichungen*. Bull. Internat. Acad. Poln. Sci. Lettres A, 1937.
- [5] Germaneau, A., Doumalin, P., Dupré, J.C. *Strain*, 43 (3), p. 207-218, 2007.