

Etude numérique et expérimentale du procédé d'élaboration de matériaux composites par infusion de résine (LRI :Liquid Resin Infusion)

P. WANG^a, S. DRAPIER^a, J. MOLIMARD^a, A. VAUTRIN^a, J.C. MINNI^b

a. Centre science des matériaux et des structures & LTDS UMR CNRS 5513 ENSM-SE, 158, cours Fauriel – 42023 Saint-Etienne cedex 2 – France

b. HEXCEL Corporation SAS, 38630 Les Avenières – France

Résumé :

Les procédés par infusion de résine LRI (Liquid Resin Infusion) sont les procédés de fabrication particulièrement intéressants pour les pièces en composites complexes ou de grandes dimensions. Ils sont basés sur l'écoulement d'une résine liquide, à travers son épaisseur, induit par une pression appliquée sur un empilement de renforts et de résine liquide. L'optimisation du procédé est difficile à réaliser car le volume de la préforme change fortement pendant le procédé du fait qu'elle est soumise à une pression extérieure et qu'il n'y a pas de contre moule. Pour optimiser les paramètres de fabrication des matériaux composites par infusion de résine, il est nécessaire de mettre en œuvre un modèle numérique. Récemment, une modélisation de l'écoulement d'un fluide isotherme dans un milieu poreux compressible a été développée [1,2]. Pour valider le modèle et améliorer la compréhension et la maîtrise des paramètres de remplissage pendant le procédé LRI, il faut mener une approche expérimentale. Un des points clefs de ces travaux de recherche est que le temps de remplissage et les propriétés finales de la pièce en composite dépendent intrinsèquement de paramètres qui évoluent pendant l'infusion, tels que la variation de l'épaisseur et le taux volumique de fibres, via la perméabilité.

Abstract :

LRI (Liquid Resin Infusion) are promising manufacturing processes to produce large, thick or complex structural parts. They are based on the resin flow induced, across its thickness, induced by pressure applied onto a preform / resin stacking. However, the thickness and the fiber volume fraction of the final piece are not well controlled, due to the use of a vacuum bag instead of a rigid mould and the large variation of the preform volume when vacuum and pressure are applied. In order to optimize both the design and manufacturing parameters and monitor the LRI process, it is necessary to develop a numerical model. A new isothermal model which describes the mechanical interaction between the deformations of the porous medium and the resin flow during infusion has been developed recently [1,2]. To validate the model and to improve the knowledge of the LRI process, an experimental approach is needed. One key question of the research work is to monitor the filling time and the final properties of the pieces that are intrinsically dependent on the process parameters changing during the filling stage, such as the thickness variation of the preform and the fiber volume fraction of the preform.

Mots clefs : infusion de résine, LRI: Liquid Resin Infusion, modèle numérique, temps de remplissage, variation de l'épaisseur, taux volumique de fibres, perméabilité

1 Introduction

Les procédés par infusion de résine LRI (Liquid Resin Infusion) sont de nouveaux procédés de fabrication de pièces complexes ou de grandes dimensions par écoulement de la résine liquide à travers l'épaisseur de l'empilement des préformes. Dans ce cas, la couche de résine est réalisée à l'aide d'un tissu drainant fortement perméable et placé au dessus de l'empilement de fibres préformées (figure 1). Le différentiel de pression entre l'arrivée de résine, située au niveau du drainant, et l'évent, situé sur la base de la préforme, provoque l'infusion de la résine dans le drainant puis à travers l'épaisseur des préformes sèches.

Dans le procédé de LRI, l'épaisseur et le taux volumique de fibre de la pièce finale ne sont pas complètement contrôlés car un sac à vide remplace un moule rigide, donc il y a des grandes variations du volume lorsque le vide ou la pression sont appliquées. Pour optimiser les paramètres de la conception et la fabrication, récemment, une modélisation de l'écoulement d'un fluide isotherme dans un milieu poreux compressible a été développée [1,2]. Dans cette approche, on suppose que la résine remplit d'abord un drainant à forte perméabilité et infuse ensuite progressivement suivant l'épaisseur de la préforme.

Pour valider le modèle et améliorer la compréhension et la maîtrise des paramètres de remplissage pendant le procédé LRI, une approche expérimentale est indispensable. Le but de ces travaux de recherche est que le temps de remplissage et les propriétés finales de la pièce en composite dépendent intrinsèquement de paramètres qui évoluent pendant l'infusion, tels que la variation de l'épaisseur et le taux volumique de fibres. Ici nous allons utiliser des thermocouples pour estimer le remplissage des préformes et une méthode de projection de franges pour mesurer la variation moyenne de la préforme au cours du procédé.

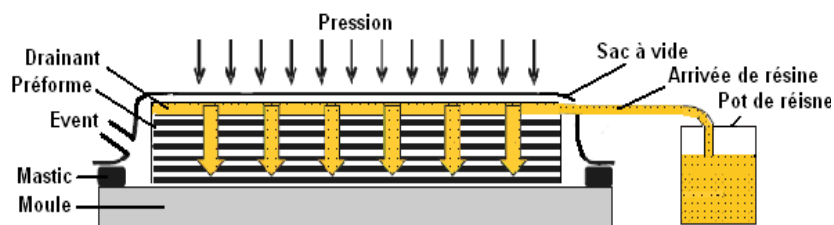


FIG.1 – Principe du procédé LRI.

2 Modèle d'écoulement de l'infusion de résine

Dans le modèle macroscopique de Celle et al. [1,2] les deux constituants (la résine et les préformes) sont représentés dans 3 différentes zones séparées par des frontières mobiles, correspondant chacune aux préformes sèches, aux préformes saturées de résine, et à la résine seule (figure 2). Ce modèle intègre des conditions aux limites et conditions de continuité au niveau des interfaces. La modélisation macroscopique choisie est plus simple à gérer en termes de temps de calcul. Toutefois, la partie fluide et la partie solide peuvent aisément être modélisées.

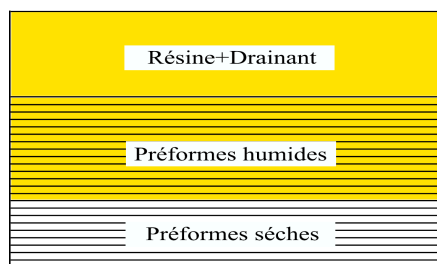


FIG.2 – Différentes zones modélisées pour le procédé LRI.

L'écoulement de la résine dans le drainant est étudié comme un écoulement d'un fluide Newtonien incompressible et peut être modélisé à partir des équations de Stokes. Le problème de l'écoulement de la résine dans les préformes va consister en l'étude de l'écoulement d'un fluide visqueux dans un milieu poreux compressible. Comme indiqué précédemment, des modèles macroscopiques sont utilisés, sous la forme de la loi de Darcy (équation 1) ou de l'équation de Brinkman. Ici nous nous intéressons plus à la loi de Darcy qui reste valable tant que le régime d'écoulement est laminaire et lorsqu'il y a une faible perméabilité dans la préforme. Un facteur essentiel, dans la modélisation comme dans le procédé lui-même est la perméabilité. Ce 'paramètre' essentiel est responsable, avec la viscosité du fluide, de la cinétique d'écoulement de la résine dans les préformes. Elle est fortement dépendante de la porosité mais dépend également du niveau de saturation des préformes. Dans un premier temps, l'approche la plus simple que nous avons retenue consiste en l'utilisation de relation de Carman-Kozeny dans notre modèle numérique pour relier la perméabilité des préformes à leur porosité connue par résolution de l'équilibre mécanique des préformes saturées.

La modélisation de la partie solide consiste à étudier le comportement des préformes sèches et humides qui sont considérés comme un milieu solide et le mouvement des préformes est décrit par une formulation

Lagrangienne. Celle et al ont proposé l'hypothèse de Terzaghi pour modéliser le comportement des préformes imprégnées par le fluide. Dans ce modèle, l'influence de la résine est prise en compte à travers sa pression hydrostatique.

3 Approche expérimentale sur le procédé LRI

Pour suivre l'évolution de l'épaisseur et de la température de la préforme pendant l'infusion, nous avons choisi des techniques basées sur des capteurs in-situ (micro-thermocouples) et sur la méthode de projection de franges. Nous avons réalisé une plaque à partir d'empilements de 24 plis, des tissus UD (Uni Directionnel) de carbone. La séquence est $[90_6,0_6]_S$, la plaque est donc équilibrée et symétrique. Les dimensions du stratifié sont 350mm×350mm×10mm. Pour l'élaboration, la préforme est posée sur une plaque chauffante qui est maintenue à 120°C pendant l'infusion de résine. Une résine type HexFlow© RTM-6 est utilisée, elle est pré-chauffée dans un pot chauffant à 80°C. Parce que nous souhaitons mesurer le gonflement de la préforme grâce à la méthode de projection de franges, le couvercle de chauffage est maintenu ouvert pendant l'infusion de résine.

3.1 Evolution de l'épaisseur de la préforme pendant l'infusion

La variation de l'épaisseur de la préforme a été enregistrée au cours de l'infusion de la résine en utilisant une méthode de projection de franges [4]. Le principe physique de la méthode de projection de franges est simple: un motif périodique de frange bi-couleur est projeté sur un objet, la lumière diffusée par l'objet est enregistrée par une caméra CCD. La déformation de la frange est enregistrée comme une phase. Cette déformation est ensuite transformée en un déplacement de l'objet.

Le montage expérimental et les résultats correspondants sont représentés sur les figures 3 et 4. Sur la figure 4, les 5 points de mesure considérés permettent de déduire que la résine infuse les préformes en 3 étapes [3] : 1- la résine remplit le drainant rapidement (106s, zone A), 2- la résine imprègne le système sans variation de volume (zone B), 3- la résine imprègne le système avec variation de volume (zone C). Enfin, le temps de remplissage total est 1320s et l'augmentation de l'épaisseur totale varie de 600 à 1006µm. La variation de l'épaisseur moyenne du drainant est 150µm estimée dans la zone A et celle de l'ensemble du système est 740µm [3].

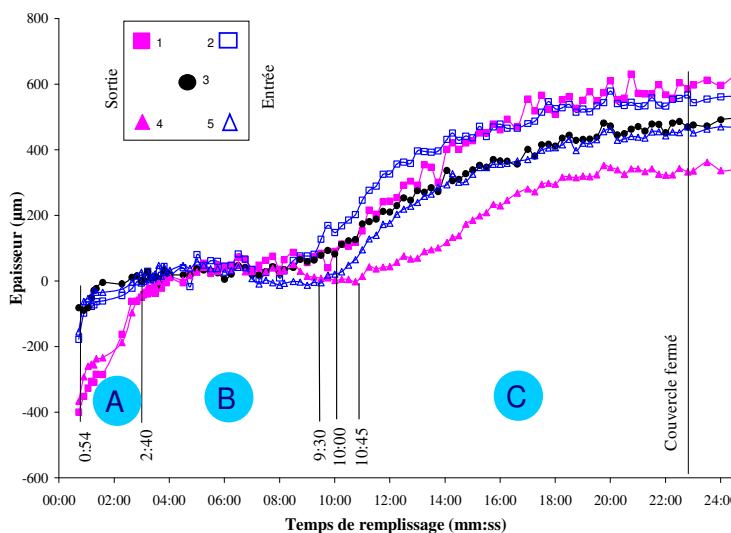
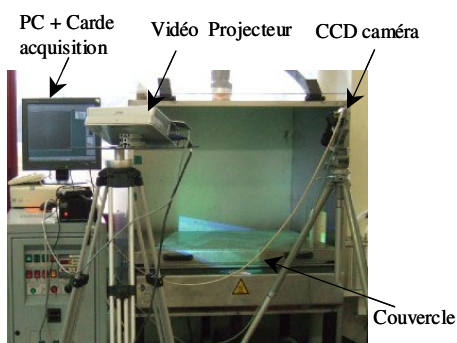


FIG. 3 – Installation expérimentale avec projection des franges.

FIG. 4 – Variation de l'épaisseur de la préforme en fonction du temps de remplissage.

3.2 Détection de la température de la préforme au cours de l'infusion avec les thermocouples in-situ

Dans notre essai, 3 micro-thermocouples, type K ont été choisis et positionnés entre le 3^{ème} et 4^{ème} pli, zone où la température est la plus homogène. Ils sont sur la même ligne médiane de la plaque, pour éviter les effets du bord, il y a 50mm de distance entre le bord et les thermocouples à l'entrée et la sortie (voir figure

5). Ce type de micro-thermocouple est constitué de 2 fils de diamètre $79\mu\text{m}$, ce diamètre permet d'avoir très peu de perturbations pendant le procédé d'infusion. Les données sont acquises par le biais d'une unité d'acquisition : Agilent 34970A. La fréquence d'acquisition répond à nos besoins (fréquence maximale de 20 valeurs/seconde), et sa résolution est de $0,1^\circ\text{C}$ en mesure de température. Les thermocouples ont été étalonnés par rapport à une température stabilisée (3 paliers) et comparés avec les mesures d'une sonde platine (PT100). La précision sur cet étalonnage est $0,1^\circ\text{C}$.

Les résultats mesurés sont présentés figure 6. On constate que le gradient de température dans l'épaisseur de la préforme est grand ($\approx 15^\circ\text{C}$). Par contre, il y a environ 3°C - 5°C de variation de température pour chaque thermocouple pendant l'infusion de résine. Le couvercle est fermé pour chauffer le système au début de l'infusion, ensuite il est ouvert ce qui implique une stabilisation de la température. L'arrivée de la résine entraîne une chute de température dans toute la préforme car la vitesse de remplissage du drainant est supérieure à celle de remplissage de la préforme. Enfin, le système se réchauffe grâce à la plaque chauffante jusqu'à une température stable, en fin de remplissage. Ici, le temps de remplissage pour le drainant est environ 120s (observation) et le temps de remplissage pour tout le système est environ 1400s (zone de stabilisation de la température). En fait, ce temps de remplissage quasiment le même que celui des observations visuelles et des mesures par projection de franges. Dans nos conditions industrielles, la technique par thermocouples permet de caractériser l'écoulement de résine au cours du remplissage [3]. On remarque qu'il y a une bonne corrélation entre le temps où on détecte la minimum de la température par les thermocouples et celui de début du gonflement de la préforme qui est obtenu grâce aux réponses analysées sur les mesures par méthode de projection de franges (voire tableau 1). Ceci tend à valider la détection du front de fluide avec les thermocouples.

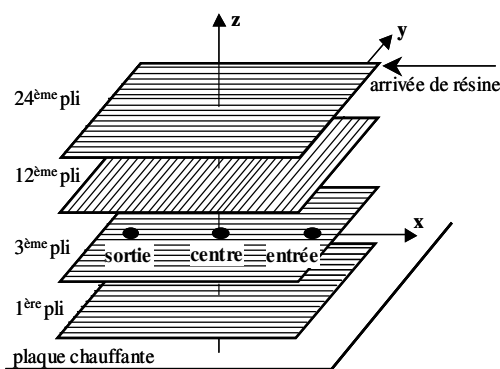


FIG. 5 – Localisations des micro-thermocouples.

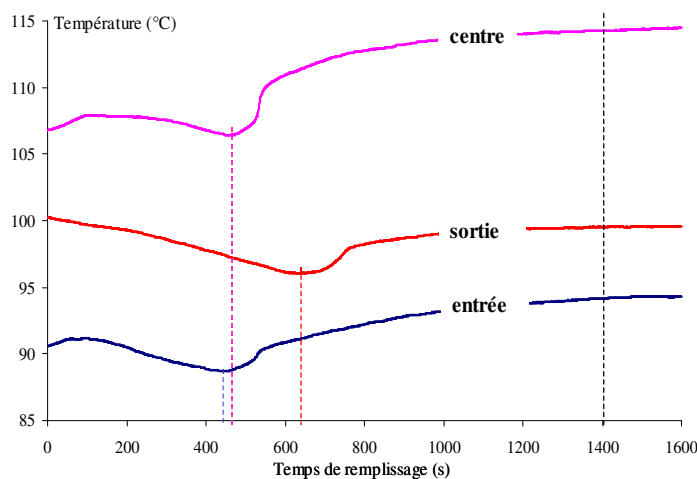


FIG. 6 – Evolution de la température en fonction du temps de remplissage.

TAB. 1 Comparaison de l'arrivée du front de résine entre les techniques des thermocouples et de projection de franges.

	Entrée	Centre	Sortie
Temps d'apparition de la température minimale (s)	440	470	620
Début du gonflement de la préforme (s)	500	510	615
Délai entre la température minimale et le gonflement de préforme (s)	60	40	5

4 Etude numérique du procédé LRI et comparaison avec l'expérimental

4.1 Loi de comportement de la préforme

Pour obtenir la loi de comportement de la préforme, un essai de compression transverse sur la même référence de tissus que précédemment est réalisé. Les résultats pour obtenir la réponse en termes de des

contraintes de Cauchy en fonction des déformations logarithmiques (figure 7). Nous considérons ici que les effets de Poisson négligeables, il y a une absence de déformations dans le plan de la préforme lors de la sollicitation dans son épaisseur.

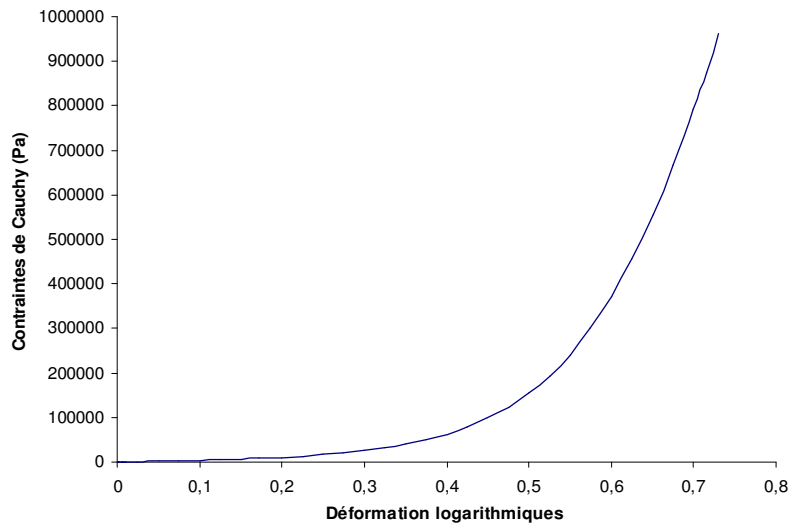


FIG. 7 – Courbe de compression transverse sur les UD G1157 secs.

4.2 Conditions aux limites

Les conditions aux limites pour l'infusion d'une plaque avec le procédé LRI sont représentées sur la figure 8. Pour la partie solide, le sac à vide crée une pression mécanique sur la surface de la préforme. La continuité du déplacement et du vecteur contrainte sont prescrits entre le drainant et la préforme. Les déplacements sont nuls dans le plan sur les bords latéraux. Pour la partie fluide, la résine pénètre le drainant grâce au système sous vide. Les continuités de la vitesse normale de la résine et de la pression sont imposées à l'interface entre la zone purement fluide et la zone de préforme humide. Enfin, la vitesse de la résine est nulle sur les deux côtés de la préforme en raison de la présence du sac à vide.

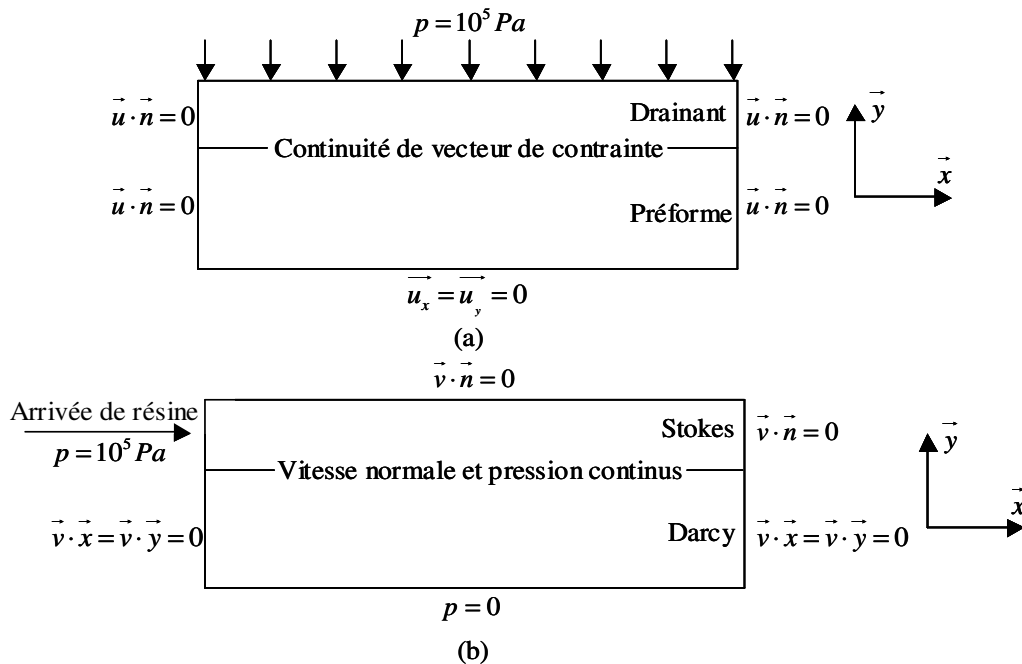


FIG. 8 – Conditions aux limites pour l'infusion d'une plaque avec le procédé LRI (a) la partie solide (\vec{u} : déplacement) et (b) la partie fluide (\vec{v} : vitesse de la résine, p : pression de la résine).

4.3 Comparaison numérique/expérimentale et discussion

Les simulations ont été réalisées avec 1426 éléments triangulaires avec une formulation mixte en vitesse-pression. Nous avons considéré la viscosité de résine constante et représenté le plus précisément possible les conditions aux limites (voir figure 8). Une comparaison entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique est donnée dans le Tableau 2. Si nous regardons la variation de l'épaisseur et le taux volumique de fibres (TVF) de la préforme, il y a une bonne corrélation entre l'approche numérique et l'approche expérimentale. Par contre, pour le temps de remplissage, nous avons obtenu une grande différence. Une cause possible importante peut être la faible température d'infusion expérimentale, due au fait que le couvercle de la table d'infusion était ouvert, ce qui entraîne une augmentation de la viscosité et, par suite, un accroissement du temps de remplissage. Un autre essai d'infusion réalisé avec couvercle fermé, nous a permis de vérifier que le temps de remplissage pour les mêmes préformes était d'environ 550s, ce qui se rapproche fortement des simulations (482s). Pour la valeur de la masse de résine absorbée, nous avons pris en compte la masse de résine utilisée par tout le système. En général, il y a environ 100g de résine dans le drainant.

TAB. 2 – Comparaison entre l'expérimental et la simulation numérique pour l'infusion d'une plaque avec le procédé de LRI avec couvercle fermé.

		Expérimentale	Simulation numérique
Après compaction	Epaisseur de la préforme (mm)	6	6,36
Après remplissage	Accroissement d'épaisseur (mm)	0,59	0,61
	Taux volumique de fibres	57,5%	56%
	Masse de résine (g)	470	382
	Temps de remplissage (s)	550	482

5 Conclusion et Perspectives

Dans le cas présent, les expériences ont montré un premier aperçu des mécanismes complexes se produisant au cours du procédé LRI et surtout pendant la phase de remplissage. Nous avons réussi à utiliser des techniques non intrusives pour suivre les paramètres importants pendant le procédé de fabrication LRI sous conditions industrielles. Elles permettent d'accéder à des informations améliorant la compréhension de l'écoulement de la résine dans la préforme pendant le procédé LRI. De plus, la simulation numérique montre une très bonne corrélation entre les résultats numériques et expérimentaux. Un facteur clé pour nous est la perméabilité utilisée dans le modèle numérique.

Comme notre modèle numérique est un modèle isotherme, il ne prend pas en compte l'évolution de la température pendant la phase d'infusion de la résine. Afin d'assurer une plus grande homogénéité thermique, nous allons également réaliser des essais dans une étuve vitrée. L'acquisition de mesures de champs pourra ainsi se faire sans création supplémentaire d'un gradient de température du à l'ouverture du moule chauffant.

References

- [1] Celle P, Drapier S, Bergheau JM., Numerical Modelling of Liquid Infusion into Fibrous Media Undergoing Compaction, *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 27, 647-661, 2008.
- [2] Celle P, Drapier S, Bergheau JM. Numerical Aspects of Fluid infusion inside a Compressible Porous Medium Undergoing Large Strains, *European Journal of Computational Mechanics*, 17: N°5-6-7, 819-827, 2008.
- [3] Wang P, Drapier S, Molimard J, Vautrin A, Minni JC., Characterization of Liquid Resin Infusion (LRI) Filling by Fringe Pattern Projection and in-situ Thermocouples, *Composites Part A*, submitted, 2008.
- [4] Breque C, Dupre JC, Bremand F., Calibration of a system of projection moiré for relief measuring: biomechanical applications, *Optics and Lasers in Engineering*, 41, 241-260, 2004.