

# Modélisation et évaluation de l'incertitude de mesure lors de l'utilisation de MMT avec des pièces déformables

Stéphane Raynaud<sup>1</sup> Valéry Wolff<sup>2,a</sup> Tin Tran Dinh<sup>3</sup> Olivier Pareja<sup>4</sup>

<sup>1</sup>MIP2, Département GMC, Laboratoire MIP2 - Métrologie Qualité, INSA de Lyon, France

<sup>2</sup>IUT LYON1, Département GMP, Université Lyon 1, France

<sup>3</sup>LAMCOS, INSA de Lyon, France

<sup>4</sup>TECHNOCENTRE Renault, Guyancourt - France

**Abstract.** In the automotive and aerospace industries, the use of plastic parts is frequent. To validate these parts, the methodology used to realize the measurement takes into account some specific elements as departure elements: points or surfaces (datum elements of the plastic part). The method also considers a thin wall associated to the theoretical geometry of the part (CAD model). The Cartesian coordinates of control points are then measured by using a Three-Dimensional Measuring Machine. We can then compare the position of these points to the nominal CAD. This paper presents a new approach to define a method of control for deformable parts. We use simultaneously simulation software and simplified control equipment. This simple measurement fixture defines the setting in position of the part and the points that need to be clamped. It represents the way the part will be assembled into the car. The implementation of this method consists in measuring different parts without any clamp or constraint (free state) to quantify the variation of the position of selected datum points. The choice of these points is linked to the setting in position we defined and the clamp of the workpiece on the simplified control device. This measurement may be done by using a laser scanner or CMM. The variations obtained will be specified as geometric tolerances in the simulation software (3DCS). This simulation tool includes a module of calculation with the finite elements method. This allows calculation of the deformation of the workpiece clamped on the simplified control assembly. The deformation is different for each part, due to the geometric variations of the parts in the free state. Virtual measurements can then be performed on the workpiece in position and constrained on the control device. This method is applied to an industrial part.

## 1 Introduction

La part des pièces plastiques dans l'industrie est en constante augmentation. Dans les domaines automobile et aéronautique plus particulièrement, l'utilisation de matériau plastique est liée à la recherche de gain de poids. Les géométries de ces pièces sont de plus en plus complexes et les parois de plus en plus fines. De ce fait, de nombreuses pièces sont déformables sous leur propre poids ou lorsqu'elles sont contraintes en position dans des assemblages le plus souvent hyperstatiques.

La maîtrise dimensionnelle de la géométrie de ces pièces déformables est un enjeu industriel majeur. Les défauts recherchés ne sont pas seulement liés à la possibilité d'effectuer l'assemblage en garantissant les dimensions maximales et minimales (par exemple avec les calculs de chaînes de cotes pour garantir un jeu fonctionnel), mais également de connaître le comportement de ces pièces suite aux déformations induites par l'assemblage. Les critères concernent par exemple les jeux et affleurements entre différentes pièces de carrosserie. Dans ce type de défaut, ce n'est pas tant la valeur du jeu qui importe, mais la régularité de l'espacement (latéral : jeu, ou normal à la surface : affleurement). Il s'agit alors de qualité perçue du produit assemblé final.

## 2 Problématique de l'étude

Le contrôle tridimensionnel des pièces est un point critique de l'industrialisation des pièces déformables. La méthode la plus couramment utilisée pour compenser les grandes variations à l'état libre de ce type de pièces consiste à définir et à fabriquer un montage de contrôle représentant la configuration de la pièce dans le produit fini assemblé. Les mesures sont alors soit réalisées par machine à mesurer tridimensionnelle, soit obtenues à partir de capteurs installés sur chacun des points à contrôler.

Les montages de contrôle sont souvent complexes et leur fabrication nécessite la mise en œuvre de moyens de fabrication entraînant un coût élevé (de plusieurs dizaines à quelques centaines de milliers d'euros).

La problématique proposée dans cette étude concerne la possibilité de remplacer en partie ces montages de contrôle par des méthodes numériques de simulation. Nous souhaitons ici proposer et valider une procédure combinant la simplification du montage de contrôle associée à la simulation du comportement de la pièce déformable sur ce montage en utilisant des méthodes de calculs par éléments finis et des calculs statistiques de dispersions.

<sup>a</sup> Email de correspondance de l'auteur: [valery.wolff@univ-lyon1.fr](mailto:valery.wolff@univ-lyon1.fr)

## 2.1 Contexte

Cette étude a été réalisée en collaboration avec le Technocentre Renault. Les pièces de carrosserie et d'habillage intérieur dans le domaine automobile sont souvent de grandes pièces fortement déformables. Pour réaliser une étude de faisabilité de la démarche proposée, nous avons pu utiliser un modèle de pièce : le montant de baie (Figure 1).

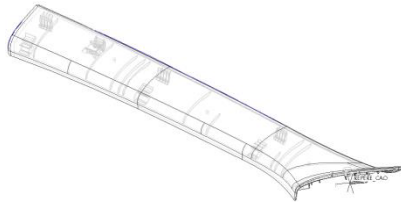


Figure 1 : Montant de baie Renault

Pour la première étude appliquée au montant de baie [7], nous avons pu disposer du modèle CAO de la pièce, d'un lot de 5 pièces réelles, du modèle CAO du montage de contrôle initial utilisé par Renault et des caractéristiques mesurées par Renault pour valider ce montant de baie en 21 points de contrôle (Figure 2).

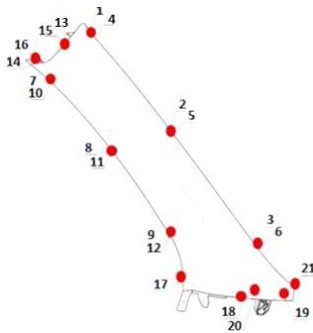


Figure 2 : 21 points de contrôle

Lors de cette première étude, nous avons pu comparer les résultats d'une simulation avec une série de mesures réalisées sur machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

La simulation a consisté en un calcul des variations de mise en position de pièces de géométrie variables sur un montage de contrôle simplifié. Cette simulation a été réalisée à l'aide du logiciel 3DCS qui permet d'observer statistiquement les effets de différentes dispersions géométriques ou dimensionnelles sur un mécanisme.

L'ensemble montant de baie plus montage de contrôle constitue un assemblage qui a été traité comme un mécanisme. La simulation de la partie métrologie (position des 21 points de contrôle) a été définie comme un ensemble de mesures fonctionnelles de cet assemblage. Cette métrologie virtuelle a été comparée à la métrologie réelle sur 5 pièces.

Les courbes présentées (Figure 3) sont : les résultats de la simulation sur la variation des 21 points de contrôle (en rouge, symboles carrés), et les valeurs obtenues pour les

mesures réelles à l'aide d'une MMT (en vert, symboles triangulaires).

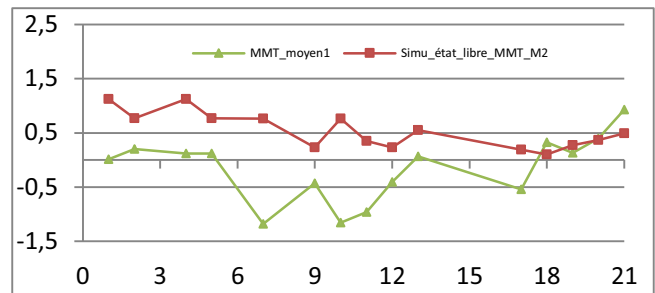


Figure 3 : Première étude sur 21 points : position en mm

Les résultats obtenus ont montré les limites de la première étude. On observe une variation similaire des 2 courbes (points 18 à 21) avec toutefois des écarts notables pour les autres points de contrôle et très variables selon les points concernés.

## 2.2 Nouveaux outils et méthodes

L'analyse des résultats obtenus a conduit à faire évoluer la méthode initiale en introduisant de nouveaux outils et en modifiant certaines hypothèses de calcul.

### 2.2.1 Scanner 3D

Les mesures réalisées à l'aide d'une MMT sur les pièces à l'état libre montrent de grandes dispersions. L'incertitude sur ces mesures est grande. En effet, la programmation de la MMT par rapport à la CAO nominale entraîne des mesures de points de surfaces éloignés lorsque la géométrie de la pièce varie. Les précautions prises en utilisant des mesures de points de bords et en construisant des repères de positionnement locaux adaptés à la géométrie réelle n'ont pas été suffisantes pour la totalité des 21 points.



Figure 4 : Bras Faro et scanner 3D

L'utilisation d'un scanner 3D (Figure 4) en complément de la MMT devrait permettre d'améliorer les résultats de la mesure et de compléter les informations utilisées en entrée de la procédure de simulation.

### 2.2.2 Compliant modeler de 3DCS

L'outil utilisé pour simuler le comportement de la pièce sur son montage est le logiciel 3DCS. Pour résumer la démarche, on peut se référer aux étapes suivantes :

- 1 Modélisation du positionnement de la pièce nominale sur le montage de contrôle : identification des points de positionnement (3-2-1) et des points liés au bridage de la pièce sur le montage (contact à mettre en place).
- 2 Mesures des pièces à l'état libre : les 5 pièces réelles présentent des variations de géométrie qui ont été quantifiées en ce qui concerne les points de positionnement (3-2-1) et les points de serrage.
- 3 Introduction des valeurs obtenues pour les dispersions des pièces à l'état libre en tant que défauts de position (cotation 3D) de ces mêmes points sur le montage de contrôle. (ce qui génère un montage variable).
- 4 Simulation par 3DCS du positionnement de la CAO nominale sur le montage devenu variable. Mesure virtuelle des positions statistiques des 21 points de contrôle.

Lors de l'utilisation de cette démarche pour la première étude, le côté déformable des pièces a été simulé en rendant le montage de contrôle variable. Selon les points de contrôle, cette inversion entre réel et simulation est plus ou moins proche des résultats réels. Dans les zones où la pièce est la plus rigide, la démarche fonctionne. A l'opposé, dans les zones ayant une forte variation de géométrie à l'état libre, le déplacement d'un corps rigide sur des appuis variables n'est plus utilisable pour simuler le comportement réel.

L'étude présentée ici introduit donc l'outil de simulation par calcul FEM (méthode de calcul par éléments finis) disponible dans le logiciel 3DCS. L'utilisation d'un calcul de déformation de type éléments finis devrait permettre de rapprocher les résultats de la simulation des mesures réelles.

### 3 Méthode proposée

L'utilisation de deux nouveaux outils qui sont le calcul par éléments finis et le scanner 3D entraîne une modification (Figure 5) de la méthodologie de travail utilisée précédemment [1][2][3][4][6].

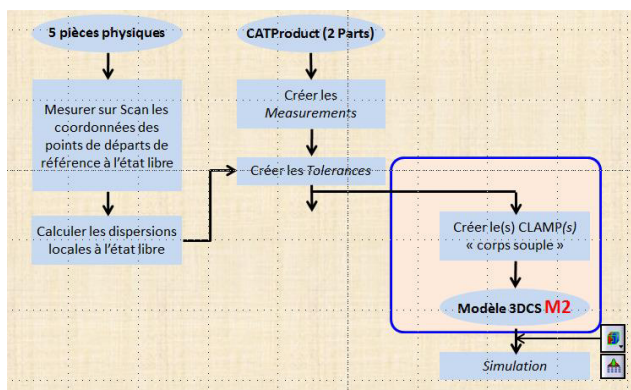


Figure 5 : Méthodologie

### 3.1 Description de la méthode

Les 5 pièces réelles de type montant de baie ont été scannées à l'état libre (Figure 6) afin de prendre en compte leur géométrie réelle et de déterminer les écarts entre le nominal et les pièces réelles. Les dispersions locales obtenues concernent les points de positionnement de la pièce sur son montage par un dégauchissage 3-2-1. Les autres points pris en compte (Figure 7) sont les points d'appui liés au bridage de la pièce.

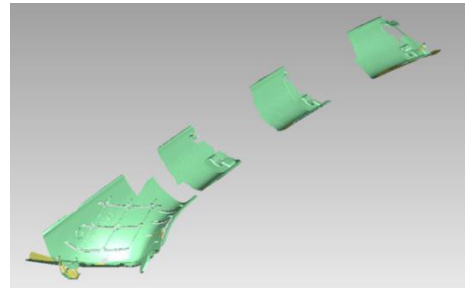


Figure 6 : Scann 3D à l'état libre des 5 pièces

Les dispersions sur les points de positionnement sont introduites sous forme de tolérances 3D associées aux points de positionnement. Ces tolérances permettent au logiciel de simulation 3DCS de générer des déplacements de la géométrie nominale considérée comme rigide.

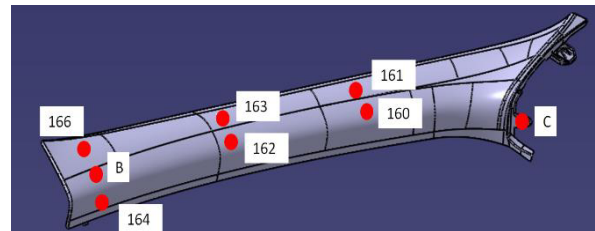


Figure 7 : Les points de poseage 3-2-1 et les points d'appui

Les mesures de la position des 21 points de contrôles sont alors définies. Dans 3DCS, ces mesures sont appelées MEASUREMENT. Leur variation est alors liée aux déplacements générés par la modélisation du comportement de l'ensemble pièce + montage de contrôle. Le positionnement 3-2-1 utilisé dans 3DCS est appelé MOVE.

La pièce réelle étant déformable, nous activons alors le module « Compliant Modeler » de 3DCS (Figure 8). Ce module permet de définir des points d'appuis appelés CLAMP. Ces points entraînent une déformation de la pièce calculée par la méthode éléments finis et soumise à des variations liées aux dispersions de la géométrie locale des pièces introduite sous forme de tolérances.

Le maillage éléments finis et les points spécifiques (21 points) de notre modèle 3DCS doivent être mis en correspondance. Cette étape nécessite de générer le maillage en imposant des points particuliers comme nœuds.

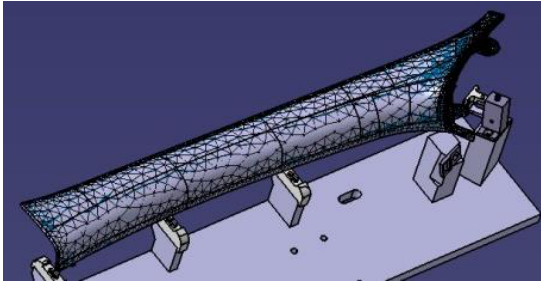


Figure 8 : Compliant Modeler, méthode de calcul FEM

### 3.2 Résultats attendus

La prise en compte de la déformation des pièces à l'état libre et à l'état contraint doit permettre une meilleure simulation du comportement réel obtenu lors de la mesure des pièces déformables placées sur des montages de contrôle. Cette méthodologie a été appliquée au montant de baie présenté pour être validée.

## 4 Application

### 4.1 Conception du montage de contrôle simplifié

Comme évoqué en introduction, la méthode proposée vise à utiliser des montages de contrôle simplifiés (moins coûteux) en les associant à une méthode numérique de simulation.

Dans le cadre de l'application au montant de baie, un montage de contrôle spécifique a été réalisé (Figure 9). Le montage original utilisé était disponible en format CAO. Le montage fabriqué reprend les points de positionnement principaux (3-2-1) du montage de contrôle initial utilisé par Renault. Ces points fixent le positionnement en bloquant les différents degrés de liberté en 3, 2 puis 1 direction (d'où la désignation 3-2-1 utilisée).

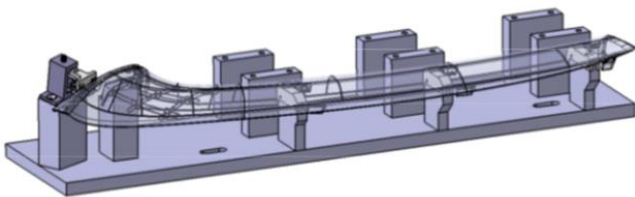


Figure 9 : Montage simplifié modélisé

Le montage a été réalisé (Figure 10) et mesuré sur MMT afin de recalibrer le modèle numérique sur le modèle réel. Les écarts liés à la fabrication ont été reportés sur le modèle CAO. Nous disposons donc pour cette étude d'une paire montage virtuel/montage réel identiques.

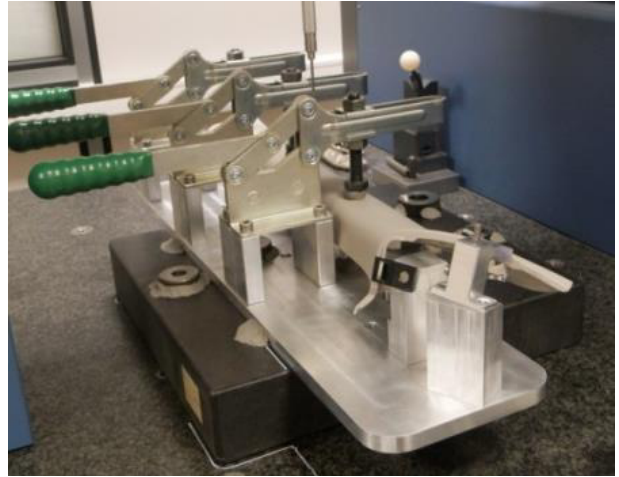


Figure 10 : montage fabriqué

### 4.2 Mesures réalisées

Le montage de contrôle présente 3 points de positionnement qui servent à définir le positionnement 3-2-1. Ces points définissent un plan ABC, une droite AB et une origine C (Figure 11).

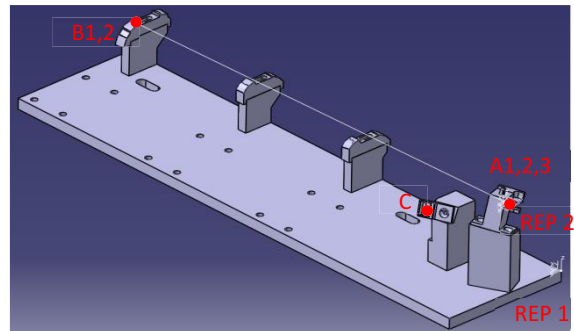


Figure 11 : Positionnement 3-2-1 sur le montage conçu

Ces points nécessitent l'utilisation de la MMT pour construire le repère associé au montage. La difficulté d'obtenir une mesure répétable concernant ces 3 points entrainerait une dispersion de la position du repère associé en cas de nouvelle mesure.

Afin de stabiliser le processus, nous avons utilisé un repère externe en 3 plans (Figure 12) et le positionnement relatif du repère associé dans ce repère externe. Cela permet de réaliser plusieurs campagnes de mesures en déplaçant si besoin le montage hors de la MMT.



Figure 12 : Repère externe

#### 4.2.1 Mesure à l'état libre (scanner)

Les 5 pièces ont été mesurées à l'état libre et les points de positionnement (3-2-1 et CLAMP) ont été quantifiés en termes de dispersions.

Les dispersions « 6 sigma » obtenues (Figure 13) sont entrées dans le modèle 3DCS comme valeurs associées au défaut de positionnement.

Points	D1	D2	D3	D4	D5	R	s	6s
160	1,418	1,679	1,861	1,431	0,451	1,41	1,66	3,419
161	1,144	1,235	1,56	0,936	0,468	1,09	1,77	2,648
162	1,759	3,87	2,982	2,752	0,802	3,07	1,05	7,439
163	2,166	1,928	2,021	1,524	1,111	1,06	1,52	2,559
164	1,55	4,824	2,778	2,934	1,392	3,43	1,38	8,322
166	1,062	3,083	1,776	2,657	0,904	2,18	1,86	5,284
B	1,837	7,903	4,435	5,231	1,111	6,79	1,37	16,469
C	-0,652	-0,529	-0,503	-0,577	-0,583	0,15	0,99	0,361

Figure 13 : variations à l'état libre

#### 4.2.2 Mesure de la maquette

Les 5 pièces ont ensuite été mesurées à l'état contraint sur le montage de contrôle (Figure 15).



Figure 14 : Pièces à l'état contraint

Les moyens de mesure à notre disposition étaient la MMT avec un capteur à déclenchement ou le scanner 3D associé au bras Faro. Une comparaison des résultats obtenus (Figure 15) montre que les 21 points contrôlés sont mesurables avec les 2 moyens en obtenant des résultats semblables.

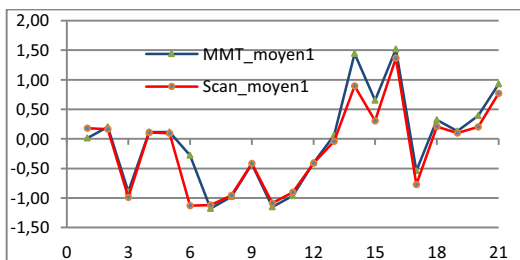


Figure 15 : Comparaison des 2 moyens de mesure

Pour la suite de l'étude, le scanner FARO a été préféré à la MMT puisque les mesures sont plus rapides. De plus, les points mesurés sur les surfaces (les 21 points de contrôle) sont plus facile à définir précisément sur les nuages de points lorsque l'on prend en compte la

déformation de la pièce réelle par rapport au modèle nominal. En effet, la MMT se déplace dans le repère associé au montage de contrôle pour palper les points en fonction de coordonnées issues du modèle nominal. Sur le scan, il est possible de déterminer quel point obtenu correspond à la position du point de contrôle initial après déformation. Pour cela, on utilise le maillage élément fini pour se repérer sur la surface de la pièce.

Les mesures obtenues sont des dispersions selon la normale à la surface (Figure 16) de chacun des 21 points de contrôle.

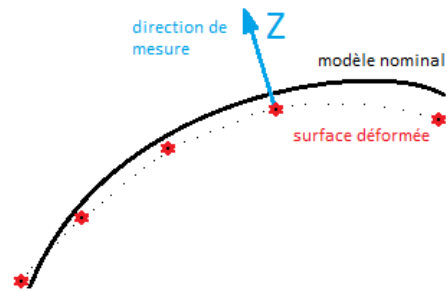


Figure 16 : Mesure des points de contrôle

## 5 Résultats

Les résultats obtenus (Figure 17) en appliquant cette nouvelle méthode se présentent sous la forme d'une courbe et d'une zone enveloppe.

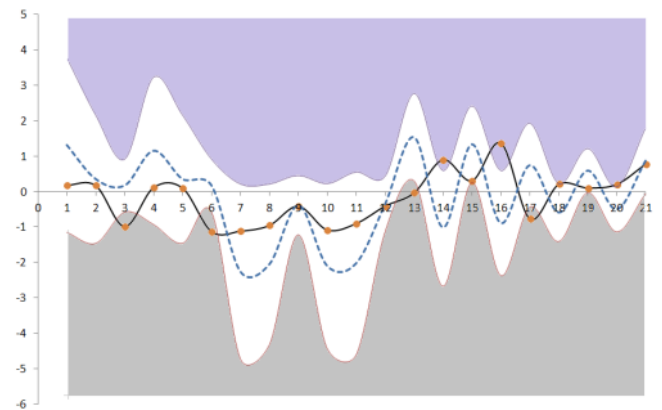


Figure 17: Résultats obtenus

La courbe noire représente la valeur moyenne obtenue par la mesure sur les 5 pièces réelles. La courbe en pointillés bleus au centre de la zone blanche est quant à elle la valeur moyenne générée par le logiciel de simulation 3DCS pour chacun des 21 points de contrôle.

On peut observer une tendance similaire sur les 2 courbes moyennes. La simulation est assez proche des mesures réelles. Toutefois, les pièces déformables entraînent de plus grandes dispersions sur les mesures. Aussi, il est souhaitable d'encadrer ces incertitudes afin d'affiner le résultat proposé.

Dans le cas de la simulation par 3DCS, la moyenne est obtenue par un tirage de Monte-Carlo de 2000 valeurs de dispersions pour les points de positionnement et de fixation (CLAMP). Pour chacun des points, les 2000 valeurs obtenues permettent d'encadrer les dispersions par des valeurs minimales et maximales. Ces valeurs ont permis de placer sur la courbe des résultats les 2 zones enveloppes encadrant les valeurs simulées à l'aide de 3DCS.

On peut observer sur le graphe que la plupart des points moyens obtenus sur les pièces réelles sont compris entre les valeurs min et maxi proposés par la simulation. La simulation du montage de contrôle et du comportement des pièces déformables sur ce même montage en fonction des variations géométriques des pièces à l'état libre présente un résultat acceptable si on le compare aux dispersions réelles mesurées.

## 6 Conclusion

La méthode proposée ici est une amélioration de la simulation de la métrologie des pièces déformables.

Cette procédure utilise les outils disponibles que sont le scanner 3D et le logiciel de simulation de mécanismes 3DCS. La prise en compte des déformations virtuelles du modèle nominal en utilisant les calculs par éléments finis du module « Compliant modeler » de 3DCS est associée aux valeurs des dispersions à l'état libre des pièces réelles.

Les calculs de la simulation permettent de représenter la réalité du comportement des différentes pièces sur le montage de contrôle. Les pièces de géométrie différentes se déforment différemment lors de leur positionnement sur les points (3-2-1) du montage en fonction des points de bridage.

La méthode proposée a montré son efficacité dans le cas d'application au montant de baie. Les perspectives de ce travail consistent à envisager l'utilisation de cette méthode à des montages et des pièces plus complexes.

## Références

1. A. Jaramillo, P. Boulanger, F. Prieto, On-line 3-D system for the inspection of deformable parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57 9–12 1053–1063 (2011).
2. A. Jaramillo, P. Boulanger, F. Prieto, Fast dimensional inspection of deformable parts from partial views, *Computers in Industry*, In Press, 2013.
3. A. Jaramillo, P. Boulanger, F. Prieto, Deformable part inspection using a spring–mass system, *Computer-Aided Design* 45 1128–1137 (2013).
4. E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt, Metrology of freeform shaped parts, *Annals of the CIRP* 56(2) 810–835 (2007).
5. V. WOLFF, D-T. TRAN, S. RAYNAUD, Using virtual parts to optimize the metrology process *Tehnomus* 19 9-15 (2012).
6. H. Radvar-Esfahlan, S.-A. Tahan, Nonrigid geometric metrology using generalized numerical inspection fixtures, *Precision Engineering* 36 (1) 1–9 (2012).
7. D-T. TRAN, Optimisation du processus du contrôle métrologie des pièces mécaniques dans le cadre d'une analyse 3D du tolérancement, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 2014.