



**HAL**  
open science

## Simulation de fabrication avec incertitudes, le modèle MMP (Model of Manufactured Part)

François Villeneuve, Frédéric Vignat

► **To cite this version:**

François Villeneuve, Frédéric Vignat. Simulation de fabrication avec incertitudes, le modèle MMP (Model of Manufactured Part). CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03362435

**HAL Id: hal-03362435**

**<https://hal.science/hal-03362435v1>**

Submitted on 1 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.

## **Simulation de fabrication avec incertitudes, le modèle MMP (Model of Manufactured Part)**

**François Villeneuve & Frédéric Vignat**

*Laboratoire G-SCOP  
Domaine Universitaire, BP53, 38041 Grenoble cedex 9, France  
Francois.Villeneuve@hmg.inpg.fr*

### **Résumé :**

*Le besoin de simuler la production et de développer des modèles tridimensionnels des pièces avec incertitudes croît fortement dans la logique actuelle d'intégration de l'ensemble du cycle de vie des produits dès la conception. Parallèlement il est de plus en plus crucial de tolérer précisément les produits à chaque étape du cycle de vie. Ce papier propose un modèle tridimensionnel des pièces avec défauts baptisé MMP (Model of Manufactured Part) autorisant la simulation 3D d'un process de fabrication et l'analyse du respect de spécifications fonctionnelles. Préalablement, la problématique du tolérancement est posée avec le concept de transfert et les méthodes unidirectionnelles éprouvées sont rappelées.*

### **Abstract :**

*The need to simulate the manufacturing process and to develop three-dimensional models of the parts including machining defects uncertainties strongly grows in the current logic of integration of product lifecycle concern at early stage of the design process. At the same time, it is more and more crucial to tolerance precisely the products at each stage its life cycle. This paper proposes a three-dimensional model of the parts with defects named MMP (Model of Manufactured Part) allowing 3D simulation of a manufacturing process and the analysis of functional tolerances. Prior to the MMP description, the tolerancing problem is introduced by the concept of transfer and the tested 1D methods are pointed out.*

### **Mots-clefs : Incertitudes ; Tolérancement ; Fabrication**

## **1 Introduction**

La conception et la production d'un produit mécanique s'inscrivent de plus en plus dans la logique d'intégration de l'ensemble du cycle de vie de ce produit. Cela suppose une place chaque jour plus prépondérante de la simulation et de la maquette virtuelle. D'autre part, l'éclatement croissant des ressources de conception et de production nécessite des standards de communication de plus en plus précis, garants d'une représentation unique et non ambiguë de la pièce à produire. Ces deux contraintes contribuent à l'accroissement de la demande industrielle, d'une part en modélisation fine des produits et de leurs défauts de production et, d'autre part, en modèle de représentation non équivoque des limites imposées aux pièces en production (spécifications de fabrication) pour le respect des spécifications fonctionnelles.

Nous présentons dans ce papier, après une synthèse de la modélisation 1D de la production des pièces et de leurs défauts géométriques, le modèle tridimensionnel MMP (Model of Manufactured Part). Le modèle MMP permet d'exprimer de manière formelle les incertitudes sur les formes géométriques des produits fabriquées. Il est utilisé pour la simulation l'analyse des gammes de fabrication vis à vis des spécifications fonctionnelles à réaliser. Les perspectives de développement de ce modèle sont ensuite évoquées, en particulier sa mise en œuvre pour la synthèse de tolérances de fabrication.

## 2 Notion de transfert et modélisation 1D de la production des pièces avec incertitude

Quel que soit le niveau de précision atteint en production, toute dimension de pièces produites en série varie d'une pièce à l'autre. Ces variations sont la combinaison de variations systématiques (dérive, usure, ...) et de variations aléatoires (efforts, intervention humaine, vibrations, ...). Il en résulte des imperfections qui vont influencer la qualité de fonctionnement du mécanisme. Il est bien sûr nécessaire de prendre en considération ces défauts et, dans la mesure du possible, de prédire leur influence – ce que l'on appelle analyse en tolérancement – mais aussi de donner les limites tolérées de variation des produits – ce que l'on qualifie de synthèse en tolérancement.

C'est la notion de transfert qui sous-tend toute la problématique du cycle de vie du produit vu sous l'aspect des défauts géométriques. On retrouvera cette notion récurrente en passant des exigences sur un mécanisme aux spécifications fonctionnelles des pièces, aux spécifications de fabrication puis aux cotes de réglage ou aux grandeurs de contrôle. La problématique du transfert peut être définie comme la recherche des relations liant une spécification géométrique condition  $C_{i,j}$  (de tolérance  $T_{C_{i,j}}$ ) à un ensemble de spécifications géométriques transférées  $T_{k,l}$  (de tolérance  $T_{T_{k,l}}$ ). Ces relations peuvent être exprimées sous forme d'une fonction de transfert  $f_i$  telle que les spécifications conditions soient exprimées en fonctions des spécifications transférées (Rosado *et al.*, 2002) :  $C_{i,j} = f_i(T_{k,l})$  (1)

Si l'on admet que les tolérances sont centrées autour des valeurs nominales, les tolérances sont représentées par la valeur absolue des dérivées des spécifications, et la relation liant les dérivées conditions et transférées permet d'établir la condition de compatibilité entre les tolérances conditions et les tolérances transférées sous la forme, au pire des cas :

$$T_{C_{i,j}} \geq \sum \left| \frac{\partial f_i}{\partial T_{k,l}} \right| T_{T_{k,l}} \quad (2)$$

De cette formulation on peut tirer trois constats essentiels :

- il est primordial de fixer les "bonnes" spécifications transférées  $T_{k,l}$  en fonction des spécifications conditions  $C_{i,j}$ . Un choix "au hasard" des  $T_{k,l}$  conduit inévitablement à un surcoût, car le respect de l'inéquation 2 entraîne une réduction des tolérances.
- il apparaît nécessaire de déterminer la fonction de transfert  $f_i$  et ses dérivées partielles. Cette détermination simple en 1D s'avère beaucoup plus délicate à obtenir en 2D ou 3D.
- Sur la base de cette formulation du problème, on peut redéfinir les notions d'analyse et de synthèse. L'analyse en tolérancement consiste à vérifier le respect de l'inéquation 2 après attribution de valeurs aux  $T_{k,l}$ . La synthèse en tolérancement consiste à répartir les valeurs  $T_{k,l}$  pour optimiser une fonction objectif (par exemple une fonction coût) en respectant l'ensemble des inéquations 2.

Deux approches 1D, conduisant à des résultats équivalents, sont aujourd'hui autorisées pour effectuer l'analyse et la synthèse lors du transfert d'une spécification fonctionnelle à une spécification de fabrication. La première, élaborée par Bourdet (1973), est dite méthode des  $\Delta l$ . Elle consiste à considérer que chaque surface d'appui ou usinée de la gamme de fabrication peut disperser dans un intervalle appelé  $\Delta l$ . Elle permet de relier de manière pertinente les dispersions et les tolérances des cotes conditions. La deuxième méthode reprend les approches vectorielles traditionnelles de transfert de fabrication avec l'avantage de donner les "bonnes" cotes, par la recherche de cotes fabriquées intéressantes ou rationnelles, à partir des surfaces actives de la phase. La paternité de cette méthode est partagée entre les contributions de Duret (1995) et Anselmetti (2003). Un rappel détaillé de ces méthodes est donné dans Vignat *et al.* (2007).

## 3 Modèle de simulation de fabrication 3D (MMP Model of Manufactured Part)

Il devient nécessaire aujourd'hui de se préoccuper de l'aspect 3D, pour les raisons évoquées dans l'introduction de ce papier. La méthode présentée ci-après simule la fabrication et détermine ses effets sur les pièces produites en terme de déviations de surface. Pour cela, un modèle de la pièce fabriquée est élaboré (MMP pour Model of Manufactured Part) qui consiste à fabriquer virtuellement un produit avec défauts et à exprimer le résultat en terme de déviations de ses surfaces vis à vis de leur position nominale (Vignat *et al.* (2003, 2007)). Connaissant les capacités 3D des moyens de production, il est alors possible de déterminer la fonction de densité de probabilité ou les valeurs extrêmes des déviations de l'ensemble des pièces produites. Le MMP est alors utilisé pour analyser les spécifications fonctionnelles en interprétant chaque spécification fonctionnelle sous forme d'un calibre virtuel à assembler avec le MMP (Villeneuve *et al.* (2005)) (voir figure 1).

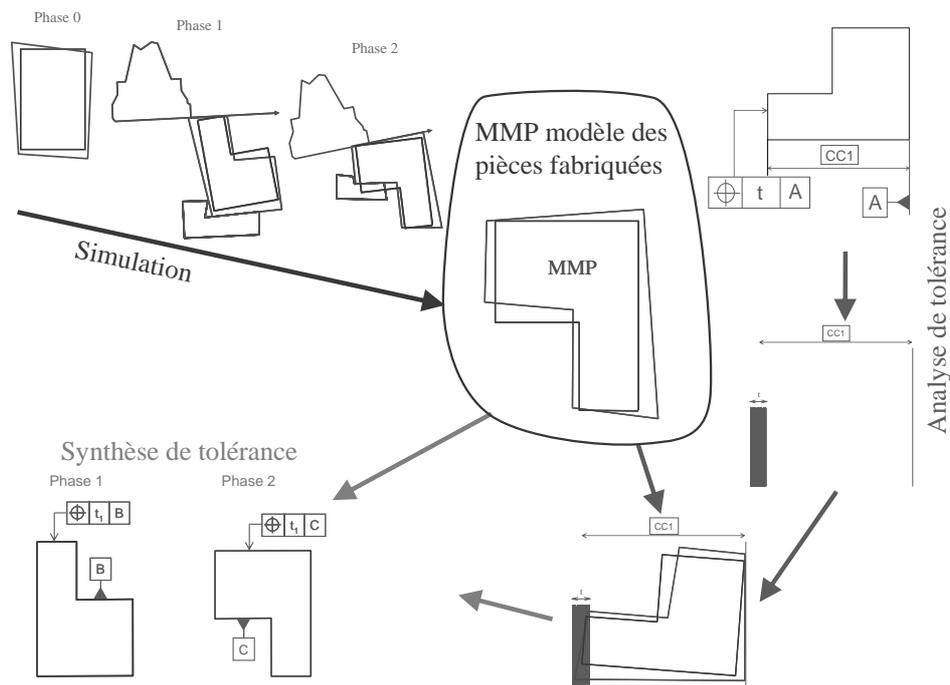


FIG. 1 – Simulation, analyse et synthèse avec le modèle MMP

### 3.1 Le modèle MMP

L'objectif du modèle MMP est de collecter l'ensemble des déviations générées par le process de fabrication envisagé. L'information principale que contient le MMP est l'ensemble des déviations des surfaces de la pièce par rapport au modèle nominal exprimées par des torseurs écart  $T_{p,pi}$ , basés sur le modèle du torseur des petits déplacements. Les surfaces modélisées sont des surfaces associées au réel, sans défaut de forme. Les déviations sont issues de l'étape de simulation de la gamme de fabrication. Les torseurs écart dépendent de paramètres caractéristiques des montages, des liens montages – pièce et des usinages. Le MMP contient également la définition de ces paramètres pour chaque surface usinée, chaque liaison élémentaire et chaque surface du montage. Ces paramètres sont limités par des contraintes représentatives des qualités des montages, des capacités des moyens d'usinage et des règles d'assemblage montage – pièce. Ces contraintes sont également intégrées au MMP. Par conséquent, le MMP contient implicitement l'ensemble des transferts possibles pour l'analyse des spécifications fonctionnelles à respecter sur la pièce. Il représente également l'ensemble des

pièces fabricables dans la limite des variations autorisées par les contraintes. Le modèle MMP collecte donc l'ensemble des incertitudes générées par le process.

Les paramètres de modélisation ont été publiés entre autre par Villeneuve *et al.* (2001).

Set-up 1						
Part Holder		Surface defects DH			Constraints CH	
Surface		Cylinder 2S1			Point 3S1	
		PX <sub>2S1</sub> , DY <sub>2S1</sub> , DZ <sub>2S1</sub> , DY <sub>2S1</sub>			PX <sub>3S1</sub> , DY <sub>3S1</sub> , LZ <sub>3S1</sub>	
Assembly						
Part-holder Surface	Link parameters LHP	Type of contact	Positioning function to maximize	Assembly constraints CHP		Part Surface
					Non penetration condition	
Cylinder 2S1	lrx <sub>2S1</sub> lry <sub>2S1</sub> lrx <sub>2S1</sub> lry <sub>2S1</sub>	Slipping	-RN <sub>2S1</sub>	$RN_{2S1} - RN_2 - r_2 - \sqrt{(-9.5 lry_{2S1} + lrx_{2S1})^2 + (9.5 lrx_{2S1} + lry_{2S1})^2} \geq 0$ $RN_{2S1} - RN_2 - r_2 - \sqrt{(5.5 lry_{2S1} + lrx_{2S1})^2 + (-5.5 lrx_{2S1} + lry_{2S1})^2} \geq 0$	0 0 0 0	Cylinder 2
Point 3S1	ltz <sub>3S1</sub>	Slipping	-ltz <sub>3S1</sub>	ltz <sub>3S1</sub> ≥ 0	0	Plane 3
Machining						
Surface	Machining defects DM	Constraints CM		T <sub>P,Pi</sub>		
Plane 4	rx <sub>4</sub> ry <sub>4</sub> tz <sub>4</sub>			$\begin{Bmatrix} lrx_{2S1} + rx_4 + PX_{2S1} - rx_4 & 0 \\ -lry_{2S1} + ry_4 - DY_{2S1} + ry_4 & 0 \\ 0 & lz_{3S1} + tz_4 + LZ_{3S1} - tz_4 \end{Bmatrix}_{O_{A,X,Y,Z}}$		
Cylinder 5	rx <sub>5</sub> ry <sub>5</sub> lx <sub>5</sub> ly <sub>5</sub>			$\begin{Bmatrix} lrx_{2S1} + rx_5 + PX_{2S1} + rx_5 & 13.5 lry_{2S1} + lrx_{3S1} - 7.5 ry_5 + 13.5 ry_{2S1} + lx_5 + DX_{2S1} + lx_5 \\ -lry_{2S1} + ry_5 - DY_{2S1} + ry_5 & 13.5 lrx_{2S1} - lry_{3S1} + 7.5 rx_5 + 13.5 rx_{2S1} + ly_5 - ly_{2S1} + ly_5 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{O_{A,X,Y,Z}}$		

TAB. 1 – Exemple d'expression textuelle d'un MMP

Le MMP peut être représenté sous la forme d'un tableau (tableau 1) dans lequel nous retrouvons (avec P pièce nominale, Pi surface usinée i, Sj phase j):

- en ① la description du montage avec :
  - les surfaces du montage,
  - les paramètres de défauts associés à ces surfaces (DH),
  - les contraintes sur ces paramètres représentatives des qualités des surfaces du montage (CH),
- en ② la description des liaisons élémentaires montage-pièce avec :
  - la surface du montage concernée,
  - les paramètres de liens pilotants (LHP),
  - les contraintes sur ces paramètres représentatives de l'assemblage (CHP) :
    - le type de contact (flottant ou glissant),
    - dans le cas d'un contact glissant, la fonction de mise en position,
    - les conditions de non pénétration qui doivent rester positives,
    - la solution simple, si elle existe, au problème de mise en position. Cette solution devient une contrainte d'égalité qui remplace, lors de la résolution du problème, les contraintes de non pénétration et de mise en position,
  - la surface de la pièce concernée,
- en ③ la description des opérations d'usinage avec :
  - les surfaces usinées,
  - les paramètres de défauts associés à ces surfaces (DM),
  - les contraintes sur ces paramètres représentatives de la capacité de la machine (CM),
  - la déviation de la surface usinée par rapport à la pièce nominale exprimée par un torseur

$$T_{P,Pi} \text{ déterminé par : } T_{P,Pi} = - \underset{\text{mise en position}}{T_{Sj,P}} + \underset{\text{usinage}}{T_{Sj,Pi}}$$

### 3.2. Simulation de fabrication : de la gamme de fabrication au MMP

Le process de fabrication est simulé en prenant en compte à chaque phase les différentes incertitudes générées. Nous faisons l'hypothèse que les défauts de fabrication résultent de deux phénomènes indépendants :

- la mise en position qui génère un défaut de positionnement du nominal par rapport à la machine. Le défaut de positionnement du nominal est dû aux défauts des surfaces du montage de mise en position, des surfaces de la pièce servant à la mise en position dans le montage et aux écarts de liens entre ces surfaces (interface),
- l'usinage qui génère des défauts de positionnement des surfaces réalisées dans la phase par rapport à la machine.

Pour chacune des phases, nous calculons la conséquence de ces défauts en termes de déviation des surfaces associées par rapport au nominal en écrivant, sous forme de torseurs des petits déplacements :

$$\text{Déviation}_{\text{Pièce nominale, Surface associée}} = \underbrace{-\text{Déviation}_{\text{Machine, Pièce nominale}}}_{\text{Positionnement}} + \underbrace{\text{Déviation}_{\text{Machine, Surface associée}}}_{\text{Usinage}}$$

Au sein de cette équation, la déviation due au positionnement dépend des déviations du montage, du lien surface du montage - surface de la pièce et des déviations des surfaces de la pièce issues des phases précédentes selon la formule :

$$\text{Déviation}_{\text{Machine, Pièce nominale}} = \text{Déviation}_{\text{Machine, Surface montage}} + \text{Lien}_{\text{Surface montage, Surface pièce}} - \text{Déviation}_{\text{Pièce nominale, Surface pièce}}$$

Une liaison montage pièce est composée de plusieurs liaisons élémentaires hiérarchisées. L'équation ci-dessus s'applique pour chacun de ces liens élémentaires et la détermination de la mise en position se fait par "unification" de la contribution de l'ensemble des liens. Pour chaque phase, nous commençons par assembler le modèle issu des phases précédentes avec le montage afin de déterminer la déviation machine-pièce, puis, en y ajoutant la déviation d'usinage, nous déterminons les déviations des surfaces créées par rapport à la pièce nominale. Cette opération est renouvelée jusqu'à la réalisation de la pièce finale.

#### 4 Analyse 3D de spécifications fonctionnelles

Le modèle virtuel de la pièce fabriquée (MMP) contient toutes les informations utiles pour l'analyse de tolérance, c'est à dire pour vérifier la conformité des pièces réalisées avec les spécifications fonctionnelles. La vérification se fait à l'aide de gabarits virtuels composés de surfaces de références qui définissent la liaison entre le gabarit et le MMP et de zones de tolérance dans lesquelles les surfaces tolérancées doivent se trouver. L'assemblage gabarit pièce est géré dans le respect des règles imposées par la norme selon une approche similaire à l'assemblage pièce montage de mise en position. Une fois le MMP et le gabarit virtuel assemblés, il est nécessaire de vérifier que la pièce virtuellement réalisée (MMP) est conforme à la spécification étudiée. Ceci est vrai si les surfaces tolérancées ne pénètrent pas les surfaces de vérification (zone de tolérance) du gabarit. La vérification de cette non pénétration se fait par la mesure de distances signées exprimées en un point  $j$  ( $\text{GapGP}_j$ ) entre la zone de tolérance du gabarit virtuel et le MMP. Si ces distances sont positives, il n'y a pas pénétration du MMP dans le gabarit, et donc conformité de la pièce fabriquée. Les points de mesure de ces distances sont définis aux extrémités des zones potentielles de contact (sommet, cercle frontière, ...) car, les défauts de forme étant négligés, c'est en ces points que les contacts ont lieu.

Simuler le process consiste à trouver la pièce qui donnera la pire valeur de vérification, soit la plus mauvaise pièce par rapport à la spécification analysée. Nous modélisons cela sous la forme d'un problème d'optimisation sous contrainte formulé de la manière suivante :

$$\begin{array}{l} \text{CM, CH, CHP} \quad \text{CGP} \\ \text{Min} \quad (\text{Max}(\text{Min}(\text{GapGP}_j))) \\ \text{DM, DH, LHP} \quad \text{LGP} \quad j \end{array}$$

On recherche le pire des cas, donc celui qui minimise la plus petite distance signée parmi l'ensemble des distances  $\text{GapGP}_j$ . L'expression de cette plus petite distance est :  $\text{Min}(\text{GapGP}_j)$

La plus petite distance signée est maximisée sous l'effet des déplacements possibles du gabarit dus aux modificateurs max ou min matière ou aux degrés de liberté laissés par certains types de spécifications. Ces déplacements sont décrits par des paramètres de lien LGP qui doivent respecter les règles d'assemblages CGP. Nous allons exploiter les degrés de liberté laissés par la spécification pour positionner favorablement le gabarit par rapport à la pièce au regard de la spécification analysée. Ceci est exprimé par :  $\text{Max}_{\text{LGP}} \dots$

Le process est considéré compatible avec la tolérance fonctionnelle analysée si, dans tous les cas de configurations des défauts (y compris le pire recherché), l'ensemble des distances reste positif, soit :  $\text{Max}_{\text{LGP}} (\text{Min}_{\text{CGP}}(\text{GapGP}_j)) \geq 0$

La recherche du pire des cas est réalisée par rapport aux paramètres de défauts du process (DM, DH et LHP) et les contraintes sur ces paramètres (CM, CH, CHP). Cette recherche du pire des cas s'exprime par :  $\text{Min}_{\text{DM,DH,LHP}} \dots$

## 5 Conclusion

La mise en place du modèle MMP et des méthodes d'analyse génériques associées ouvre une voie prometteuse à une approche 3D de simulation des incertitudes de fabrication. De plus, le modèle s'appuie sur des outils développés dans le cadre de la simulation des incertitudes dans les mécanismes ce qui permet d'envisager un modèle unifié sur le cycle de vie du produit. L'utilisation du modèle en synthèse de spécifications de fabrication est en cours, ainsi que le développement de techniques d'acquisition des paramètres du modèle sur les moyens de production.

## Références

- Anselmetti, B., 2003 Tolérancement. Cotation de fabrication et métrologie, Volume 3, Hermès Science, ISBN 2 7462 0667 6
- Bourdet, P. 1973 Chaînes de cotes de fabrication, Revue l'Ingénieur et le technicien de l'enseignement technique, n°191
- Duret, D. 1995 Détermination des intervalles de tolérance en fabrication par une approche graphique, Actes des colloques sur le tolérancement et les chaînes de cotes, ENS de Cachan
- Rosado, P.; Gonzalez, F.; Munoz, E., 2002, A 2-D tolerance transfer methodology for dimensional specifications. 6th International Research/Expert Conference. Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Neum, B&H.
- Vignat, F. & Villeneuve, F. 2003 3D transfer of tolerances using a SDT approach: application to turning process, *J. of Computing and Information Science in Engineering*, vol.3, 1, 45-53
- Vignat, F., Villeneuve, F., 2007, Analyse et synthèse tridimensionnelles de spécifications de fabrication, in Tolérancement géométrique des produits, Ed. Luc Mathieu et François Villeneuve, Ouvrage Hermès Sciences, 978-2-7462-1509-2, 311-344
- Villeneuve, F., Legoff, O. & Landon, Y. 2001 Tolerancing for manufacturing: a three dimensional model, *IJ of Production Research*, vol 39, n°8, 1625-1648
- Villeneuve, F. & Vignat, F. 2005 Manufacturing process simulation for tolerance analysis and synthesis, *Advances in IDMME*, Springer, 189-200