

## Analyse des tolérances géométriques dans un contexte multi-expertises, application à une turbine de moteur d'hélicoptère

Laurent Pierre\*, Denis Teissandier\* & Jean Pierre Nadeau\*\*

\* Université Bordeaux 1, UMR 5496, LMP  
351 avenue de la Libération, 33405 Talence CEDEX  
\*\* ENSAM, UMR 8508, TREFLE  
Esplanade des arts et métiers, 33405 Talence CEDEX  
denis.teissandier@u-bordeaux1.fr

### Résumé :

*L'amélioration de la performance d'un turbomoteur d'hélicoptère implique l'optimisation du rendement énergétique des différents composants constitutifs, et plus particulièrement la maîtrise des jeux entre les sommets des aubes de la turbine haute pression et le stator.*

*Les outils de chaînes de cotes prennent en compte la dispersion de fabrication des pièces et les défauts d'assemblage. Cela permet d'assurer l'interchangeabilité des différents composants et de garantir qu'une turbine assure différentes fonctions de service, la turbine étant modélisée en solides infiniment rigides. Mais, cette approche ne prend pas en compte des effets thermomécaniques.*

*Pourtant, les différents régimes de fonctionnement d'un moteur d'hélicoptère rendent indispensables l'intégration des effets induits par le cycle thermodynamique.*

*L'objet de cet article est de montrer comment la mise en œuvre d'outils de chaînes de cotes et d'outils thermomécaniques peut contribuer à maîtriser les jeux en sommet d'aube d'une turbine haute pression.*

### Abstract :

*The improvement of helicopter engine performances requires the optimization of the energetic yield of some components of the engine. The control of the gap between the blades and the stator of the high pressure turbines appears to be the most significant parameter of this optimization process.*

*The 3D-dimension chain tools take into account the geometric defaults of fabricated surfaces and the geometric defaults of assemblies. These tools ensure the interchangeability of the different parts of a mechanical system and the satisfaction of geometric conditions. The model of turbine is a set of interacting rigid bodies. This approach does not deal with thermodynamic effects.*

*However, the different stages of the functioning cycle of a helicopter engine require the integration of thermodynamic effects.*

*The aim of this article is to investigate the integration process of a 3D-dimension chain with thermodynamic tools in order to handle the gap between the blades and the stator of a high pressure turbine.*

### Mots-clefs :

**Tolérancement géométrique ; thermique**

## 1 Introduction

La maîtrise du comportement et du rendement énergétique des moteurs d'hélicoptère, pour chacun des différents régimes de fonctionnement, devient indispensable afin de garantir la puissance désirée. Une des voies pour améliorer les performances de ces turbomoteurs est

l'optimisation du rendement énergétique des différents composants constitutifs, et plus particulièrement la maîtrise des jeux entre les sommets des aubes de la turbine haute pression et le stator.

Cette maîtrise passe par une démarche de tolérancement géométrique à conduire pendant le cycle de conception d'un turbomoteur.

Dans une première partie, nous allons rappeler comment le modèle de surface de substitution, couramment utilisé afin de simuler des chaînes de cotes, permet de prendre en compte la dispersion de fabrication des pièces et les défauts d'assemblage. Une hypothèse sur laquelle reposent couramment les outils de simulation de chaînes de cotes est que les différentes pièces sont modélisées en solides infiniment rigides. Or, cette approche ne permet pas la prise en compte des effets thermomécaniques.

Pour palier à cette lacune, nous allons proposer de modéliser les déplacements des surfaces de liaison des pièces chaudes d'une turbine, induits par les effets thermiques. Nous montrerons comment la mise en œuvre d'outils de chaînes de cotes et d'outils thermomécaniques, peut contribuer à maîtriser les jeux en sommet d'aube d'une turbine haute pression, dans différentes phases de fonctionnement d'un moteur d'hélicoptère.

Enfin dans une deuxième partie, nous présenterons une application de ce travail à l'aide de l'outil MECAMaster sur un modèle simplifié de turbine haute pression.

## 2 Modèle de défauts géométriques pour les chaînes de cotes et les phénomènes thermiques

Les modèles géométriques utilisés dans les chaînes de cotes tridimensionnelles reposent en général sur les hypothèses suivantes : pas de défaut de forme des surfaces réelles, pas de déformation locale des surfaces en contact et pas de pièces déformables. Nous allons ici introduire un modèle permettant de prendre en compte la souplesse des pièces dépendant d'un flux thermique.

### 2.1 Chaîne de cotes de solides infiniment rigides

Les surfaces réelles sont modélisées par des surfaces de substitution (Bourdet *et al.* (1995)). Une surface de substitution est une surface idéale (i.e. géométriquement parfaite) qui a le même type que la surface nominale dont elle caractérise une réalisation physique particulière. Par exemple, la figure 1 illustre deux surfaces réelles (deux surfaces nominale planes) d'une pièce prismatique 1, modélisées par deux surfaces de substitution : deux surfaces planes. Les défauts géométriques d'une surface réelle sont définis par la position relative entre une surface de substitution et la surface nominale correspondante.

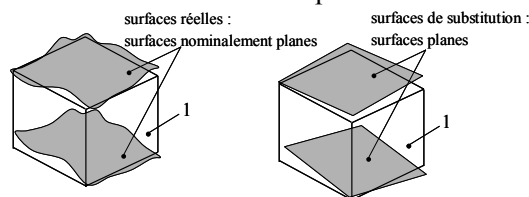


FIG. 1 – Modélisation géométrique d'une surface réelle.

La figure 2 illustre les défauts de la position relative entre deux surfaces de substitution désignées par 1,1 et 1,2 de la pièce prismatique 1.

Chaque surface est désignée par un couple de numéros : 1,2 signifie surface (de substitution) 2 de la pièce 1. Les surfaces 1,1n et 1,2n désignent respectivement les surfaces nominales correspondantes aux surfaces 1,1 et 1,2.

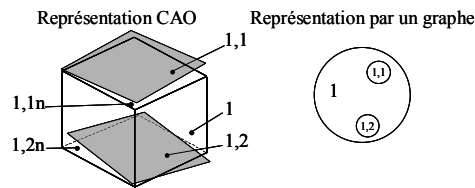


FIG. 2 – Position relative entre deux surfaces de substitution d'une pièce.

On note  $[d_{1,1/1,2}]$  les défauts de position entre les surfaces 1,1 et 1,2.  $[d_{1,1/1,2}]$  peut être formalisé mathématiquement par un torseur de petits déplacements (Bourdet *et al.* (1995)), par une matrice (Turner (1990)), etc. Dans cet article, nous utiliserons le torseur de petits déplacements (Clément *et al.* (1988)).

On a la relation suivante :  $[d_{1,1/1,2}] = [d_{1,1/1,1n}] + [d_{1,1n/1,2n}] + [d_{1,2n/1,2}]$  (1).

Etant donné que par définition le modèle nominal d'une pièce est sans défaut, on a :  $[d_{1,1/1,2}] = [d_{1,1/1,1n}] + [d_{1,2n/1,2}]$  (2).

La figure 2 donne une représentation par un graphe de la pièce 1 (grand cercle) comprenant les surfaces 1,1 et 1,2 (petits cercles). Ce graphe sert de support graphique pour montrer la structure d'un mécanisme sur laquelle on peut visualiser les chaînes de cotes (Ballu *et al.* (1999)).

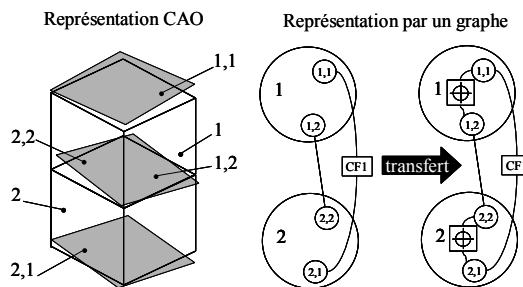


FIG. 3 – Position relative entre deux surfaces de substitution d'un assemblage.

Considérons la figure 3 : deux pièces 1 et 2 sont en contact de type appui plan fixe (les mobilités entre 1 et 2 sont supprimées) via leurs surfaces respectives 1,2 et 2,2. Au niveau de la représentation par un graphe, cela se traduit par une arête reliant les sommets 1,2 et 2,2. Supposons qu'une condition fonctionnelle CF1 limitant la position relative des surfaces 1,1 et 2,1 soit à respecter. Dans le graphe, CF1 est inscrite dans un rectangle sur une arête reliant les sommets 1,1 et 2,1. Ici les spécifications de localisation de 1,1 par rapport à 1,2 et de 2,1 par rapport par 2,2 respectivement sur les pièces 1 et 2 sont les spécifications influentes sur CF1. D'une manière générale, les deux spécifications de localisation sont le résultat du transfert de CF1 sur les pièces 1 et 2. Elles apparaissent chacune dans un rectangle respectivement dans les cercles des pièces 1 et 2.

La relation suivante formalise les dépendances entre la condition CF1, les défauts de localisation sur les pièces 1 et 2 et les défauts de la liaison appui plan entre 1 et 2 (Teissandier *et al.* (1999)) :  $[d_{1,1/2,1}] = [d_{1,1/1,2}] + [d_{1,2/2,2}] + [d_{2,2/2,1}]$  (3).

La répartition des défauts sur les pièces influentes sur CF1 peut se faire suivant le cas le plus défavorable ou bien suivant des critères statistiques :  $6\sigma$ , monte carlo, etc.

## 2.2 Chaîne de cotes de solides chauds

Considérons désormais la figure 4. Il s'agit du même assemblage décrit dans la figure 3 mais avec des sollicitations thermiques qui ont déformé les pièces 1 et 2. Nous appelons pièce

chaude, toute pièce qui subit une déformation thermique. Nous appelons désormais pièce froide, toute pièce ne subissant pas de déformation thermique. Nous prenons comme hypothèse que les liaisons sont restées inchangées entre 1 et 2. De manière plus générale, on considère que les sollicitations thermiques n'ont pas ajouté de contact supplémentaire entre des pièces et n'en suppriment pas. Cela a pour conséquence que les spécifications influentes sur la condition CF1 restent les mêmes entre la figure 3 (assemblage entre pièces froides) et la figure 4 (assemblage entre pièces chaudes).

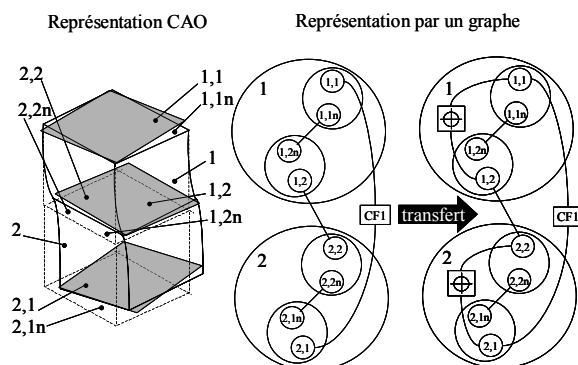


FIG. 4 – Position relative entre deux surfaces de substitution d'un assemblage de pièces chaudes.

La structure du graphe a cependant évolué afin d'intégrer les déformations thermiques des pièces 1 et 2. Le graphe de l'assemblage entre les pièces chaudes 1 et 2 fait apparaître les surfaces 1,1n ; 1,2n ; 2,1n et 2,2n correspondant respectivement aux surfaces nominales des surfaces 1,1 ; 1,2 ; 2,1 et 2,2. Deux liaisons de type encastrement sont insérées dans les pièces chaudes 1 et 2 respectivement entre les surfaces 1,1n et 1,2n et entre les surfaces 2,1n et 2,2n. Les défauts d'orientation et de position des deux liaisons encastrement caractérisent respectivement les déplacements induits par les déformations thermiques entre les surfaces de substitution des pièces 1 et 2. La relation suivante formalise les dépendances entre la condition CF1, les défauts de localisation sur les pièces 1 et 2, les défauts de la liaison appui plan entre 1 et 2 et les défauts induits par les sollicitations thermiques sur les pièces chaudes 1 et 2 :

$$[d_{1,1/2,1}] = [d_{1,1/1,1n}] + [d_{1,1n/1,2n}] + [d_{1,2n/1,2}] + [d_{1,2/2,2}] + [d_{2,2/2,2n}] + [d_{2,2n/2,1n}] + [d_{2,1n/2,1}] \quad (3).$$

Dans le cas de l'assemblage de la figure 3 (pièces froides) les torseurs  $[d_{1,1n/1,2n}]$  et  $[d_{2,1n/2,2n}]$  sont des torseurs nuls.

Dans une démarche d'analyse de tolérances, deux approches sont possibles pour répartir les défauts géométriques sur les pièces influentes :

- les déplacements induits par les sollicitations thermiques sont connus et le problème de répartition des défauts est similaire à celui d'un assemblage de pièces froides.
- les déplacements induits par les sollicitations thermiques ne sont pas connus et il convient alors de coupler la répartition des défauts avec un outil de simulation de sollicitations thermiques.

### 3 Application à une turbine haute pression

#### 3.1 Description de la turbine

La turbine est composée de deux sous-ensembles : un rotor (constitué des pièces repérées P, Q, A) et un stator (constitué des pièces repérées C, D, E, F, G, H, J, K, L, M) en liaison pivot suivant  $x$  par l'intermédiaire d'un roulement à billes repéré N et d'un roulement à rouleaux cylindriques repéré B : voir figure 5. La pièce A a une forme de révolution dont le plus grand

diamètre correspond au diamètre de têtes des pales, et la condition fonctionnelle CF caractérise le jeu en sommet d'aube entre les pales de la pièce A et la pièce H du stator : voir figure 5. Afin de maximiser la puissance de la turbine, CF doit être minimisée en s'assurant que dans toutes les phases de fonctionnement de la turbine la pièce A ne vienne pas toucher la pièce H.

En fonctionnement, un flux de gaz chauds (1000 °C environ) est créé par la chambre de combustion (non représentée sur la figure 5) ce qui a pour conséquence de transformer les pièces E, A et H en pièces chaudes : voir figure 5.

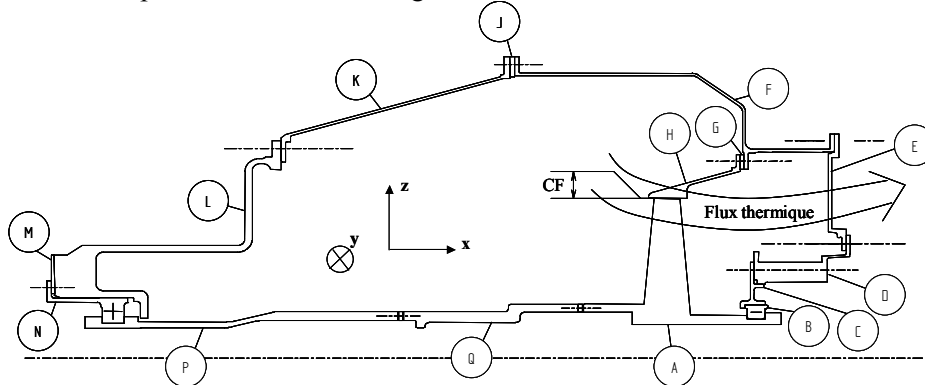


FIG. 5 – Modèle géométrique simplifié d'une turbine haute pression.

Les spécifications géométriques des pièces doivent donc prendre en compte les dispersions de fabrication et les écarts géométriques induits par les flux thermiques.

### 3.2 Modélisation de la turbine

Nous avons modélisé la turbine représentée en figure 5 à l'aide de l'application MECAMaster (Clozel (2001)) : voir figure 6.

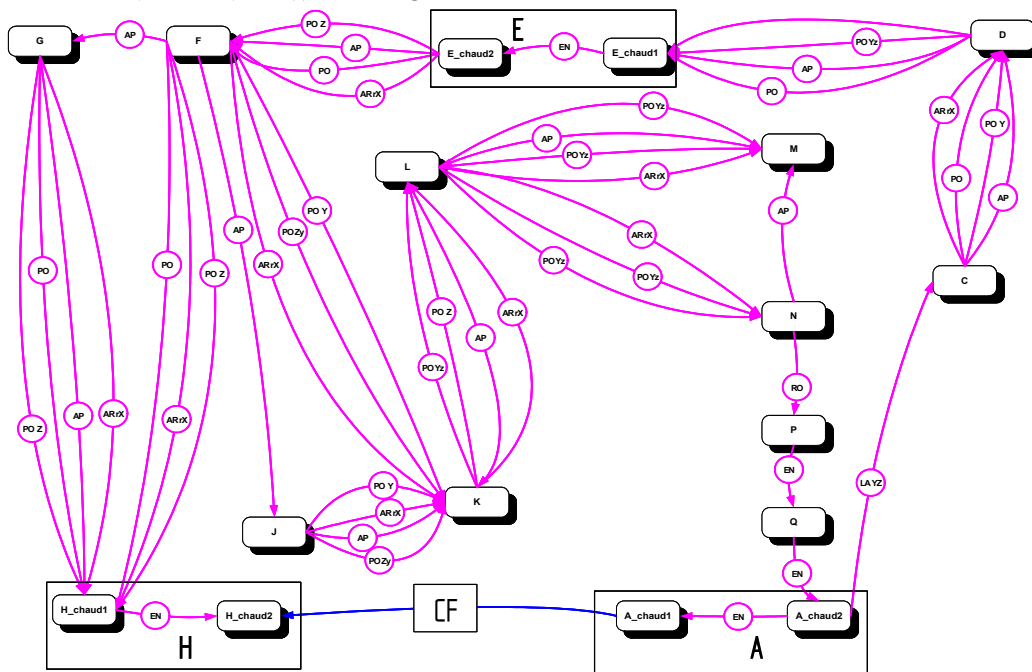


FIG. 6 – Graphe MECAMaster de la turbine haute pression.

Les pièces chaudes E, A et H ont été modélisées selon les hypothèses et le principe détaillés dans le paragraphe 2. Le flux thermique provoque un déplacement des surfaces de

liaisons de E avec F par rapport aux surfaces de liaisons de E avec D : ceci est modélisé par la liaison encastrement entre E\_chaud1 et E\_chaud2. De plus, le flux thermique induit un déplacement du cylindre de tête des pales de la pièce A par rapport à l'axe de rotation du rotor : ceci est modélisé par la liaison encastrement entre A\_chaud1 et A\_chaud2. Enfin, le flux thermique induit un déplacement de la surface cylindrique de H qui est en vis à vis avec le cylindre de tête des pales par rapport aux surfaces de liaisons de H avec G : ceci est modélisé par la liaison encastrement entre H\_chaud1 et H\_chaud2. Les défauts spécifiés dans les trois liaisons encastrement modélisant les déplacements induits par le flux thermique proviennent de simulations par éléments finis et de mesures réalisées par des experts thermiciens.

Les liaisons caractérisant les contacts entre les pièces de la turbine (voir figure 5 et 6) résultent d'un travail classique de modélisation en tolérancement géométrique que nous ne détaillerons pas dans cet article.

Les simulations réalisées pour calculer CF avec MECAmaster montrent que les déplacements induits par le flux thermique contribuent à hauteur de 20% dans la valeur totale de CF.

#### 4 Conclusions

Les modèles de chaînes de défauts utilisés en chaînes de cotes tridimensionnelles traditionnellement dédiés à prendre en compte les dispersions de fabrication permettent d'intégrer des défauts provenant de phénomènes physiques tels que la thermique. Cet article a montré une application sur une turbine haute pression de moteur d'hélicoptère.

Les perspectives de ce travail s'orientent vers l'étude de la répartition des défauts géométriques sur des pièces froides et chaudes couplée à un outil de simulation de thermique. Un des objectifs est de parvenir à proposer des critères de qualification des solutions techniques envisagées dans le cycle de conception d'une turbine haute-pression de moteurs d'hélicoptère à l'aide des spécifications géométriques.

Remerciements : Jean Luc Breining et Thomas Morillon de la société Turbomeca pour leurs conseils et aides techniques à la réalisation de ce travail.

#### Références

- Clément, A. & Bourdet, P. 1988 A Study of Optimal-Criteria Identification Based on the Small-Displacement Screw Model. *Annals of the CIRP* Vol. 37/1/1988.
- Bourdet, P. & Ballot, E. 1995 Geometrical behavior laws for computer aided tolerancing. In proc. of the 4<sup>th</sup> CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing (ed. F. Kimura); pp. 143-153.
- Ballu, A. & Mathieu L. 1999 Choice of functional specifications using graphs within the frame work of education. In proc. of the 6<sup>th</sup> CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing (ed. F. van Houten & H. Kals), pp. 197-206, Kluwer academic publisher.
- Clozel, P. 2001 3D tolerances analysis from preliminary study, In proc. of the 7<sup>th</sup> CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing (ed. P. bourdet & L. Mathieu), pp. 93-104, Kluwer academic publisher.
- Teissandier, D., Couétard, Y. & Gérard, A. 1999 A Computer Aided Tolerancing Model : Proportioned Assemblies Clearance Volume. *CAD* **31**, 805-817.
- Turner, J. U. 1990 Relative positioning of parts in assemblies using mathematical programming. *CAD* **22**, 394-400.