

## Processus d'usinage de Pièces Aéronautique Simulations et Observation

G. Rebergue<sup>1</sup>, E. Salas Rascón<sup>1</sup>, P. Rambaud<sup>2</sup>, B. Blaysat<sup>1</sup>, H. Chanal<sup>1</sup>, S. Durieux<sup>1</sup>,  
K. Mocellin<sup>2</sup>, E. Duc<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup> Mines ParisTech, CEMEF - Centre for Material Forming, CNRS UMR 7635, 1 rue Claude Daunesse, 06904 Sophia-Antipolis, France

**Résumé** — Cette présentation illustre des travaux concourant à la proposition d'une simulation fidèle du comportement mécanique des pièces durant l'usinage à l'instar des autres procédés comme la fonderie ou la forge. Les pièces aéronautiques, de part leurs grandes dimensions mais aussi la grande partie de matière éliminée par usinage, se déforment particulièrement pendant celui-ci. Dans ce travail, deux modèles numériques, ainsi qu'une méthode de mesure de champs cinématique par corrélation d'image numérique dédiée au contexte de l'usinage, sont présentés. Enfin, les résultats des simulations sont confrontés aux mesures expérimentales. Les résultats présentés sont issus des travaux mis en oeuvre dans le cadre du projet ANR SIMP-Aéro.

**Mots clés** — Usinage, Contraintes résiduelles, Simulation, Corrélation d'image numérique.

## 1 Introduction

La conception des pièces de structure aéronautique répond à une exigence de résistance mécanique tout en cherchant une réduction du poids et une minimisation du coût de fabrication. Les pièces sont physiquement réalisées à partir d'une préforme, dont 80% à 90% de la masse est éliminée par usinage. Ce fort enlèvement de matière engendre un rééquilibrage des contraintes internes induites par la mise en forme initiale. Cela peut, dans le cas des pièces de grandes dimensions en alliages d'aluminium fortement alliés, déformer la pièce usinée ce qui augmente le coût et le temps de fabrication. La maîtrise de cette déformation est donc un facteur de réduction des coûts et d'optimisation du processus, par la simplification des opérations et le contrôle du volume de métal engagé. Durant l'usinage, la déformation de la pièce dépend de la situation d'usinage et en particulier du type de bridage utilisé, ainsi que de la planification de l'usinage qui produit un rééquilibrage continu des contraintes. Le problème d'identifier la gamme de fabrication qui aboutit à la distorsion minimale n'est pas résolu. Les travaux présentés s'appuient sur les résultats du projet ANR SIMP-Aéro dont le but est de proposer une modélisation théorique et expérimentale de la distorsion de la pièce pendant l'usinage. Ce résumé est organisé de la manière suivante : après une succincte présentation de la pièce support de l'étude, deux méthodes de simulation de la distortion de cette pièce pendant son usinage sont présentées. Ensuite, une méthode d'observation *in situ* est développée et comparée à une mesure sur banc de métrologie. Enfin, les résultats numériques et expérimentaux sont comparés avant de conclure.

## 2 Méthodes

### 2.1 Cas test support de l'étude

La pièce support de l'étude, est illustrée Figure 1(a). Elle est usinée à partir un bloc d'aluminium 7010 obtenu par laminage. En raison du volume important de matière retiré durant l'opération d'usinage, ainsi que la présence de parois minces, cette pièce est considérée comme représentative des pièces aéronautiques usinées. Cette géométrie est une variante des géométries étudiées durant le projet OFE-LIA [1, 2]. La pièce est usinée dans un brut de dimensions  $100 \times 100 \times 1000$  [mm<sup>3</sup>]. Durant l'usinage, le maintien en position de la pièce est assuré par 4 brides à ses extrémités. Enfin, la distribution des contraintes résiduelles au sein du brut est assumée connue (*cf* Figure 1(b))

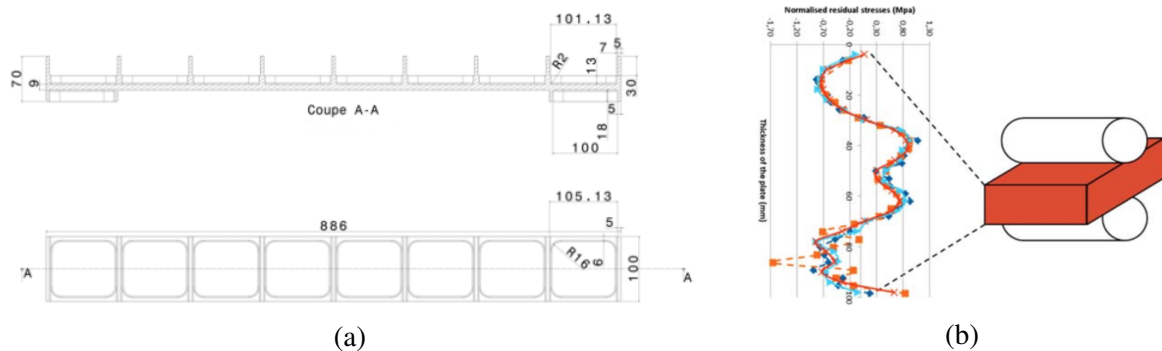


FIGURE 1 – Plan (a) et illustration CAO (b) distribution des contraintes résiduelles dans l'épaisseur. La géométrie est représentative des pièces aéronautiques usinées. La distribution (b) est adimensionnée.

## 2.2 Simulations

Deux approches prédictives sont utilisées au sein du projet ANR SIMP-Aéro. Chacune des approches a un objectif propre : l'une s'intéresse à la modélisation la plus complète du comportement de la pièce au cours de l'usinage, tandis que l'autre priorise un temps de calcul extrêmement réduit pour l'optimisation de la conception de sa forme. La première approche repose sur un modèle éléments finis volumique, complet, où entre autres chaque passe d'usinage est prise en compte. La seconde approche consiste en un modèle poutre, dont la forme n'évolue pas après chaque opération d'usinage.

### 2.2.1 Estimation fine à l'aide d'un modèle complet

L'outil numérique développé pour simuler le processus d'usinage s'appuie sur le logiciel commercial FORGE. En effet, ce logiciel originellement destiné à simuler le processus de forgeage a déjà été modifié [3] afin de simuler le processus d'usinage. Lors d'une étape d'initialisation la carte des contraintes résiduelles (cf Figure 1(b)) est utilisée comme chargement volumique au sein de la pièce. Une première simulation permet de réaliser la mise en position et le maintien en position de la pièce sur la table d'usinage à l'aide de brides considérées comme infiniment rigides. Ensuite pour chaque étape d'enlèvement de matière le logiciel réalise 2 opérations : la matière à usiner est déterminée et permet de définir le découpage du maillage ; dans un second temps le maillage obtenu est support d'un calcul mécanique dont le but est de rétablir l'équilibre des contraintes au sein de la pièce. Ce calcul peut conduire à l'obtention des distorsions de la pièce. De récents travaux portent sur une optimisation du remaillage permettant de simuler les étapes d'enlèvements de matière [4]. En effet, les coûts de calculs de l'approche initiale ne permettaient pas la simulation rapide de pièces industrielles [3].

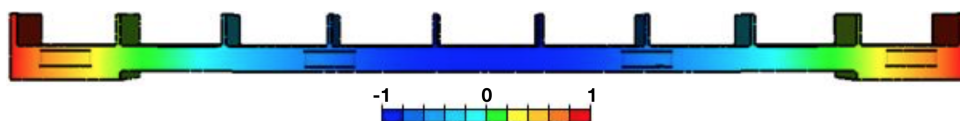


FIGURE 2 – Illustration de la composante verticale du déplacement obtenue à l'aide de l'outil numérique [4]. Le déplacement est ici normalisé. Il correspond à l'état déformé de la pièce une fois celle-ci usinée et débridée.

Ce premier outil permet ainsi de prédire la déformation finale de la pièce après les usinages ainsi que la déformation tout au long du processus d'usinage.

### 2.2.2 Estimation rapide grâce à un modèle léger

L'outil de simulation léger s'inscrit dans le développement d'un outil d'aide à la conception. En effet, afin d'améliorer les performances des pièces aéronautiques, il apparaît nécessaire de considérer la genèse des pièces dans son ensemble, de leur conception à leur fabrication. L'amélioration de cet ensemble nécessite alors la simulation de l'usinage. Toutefois, celui-ci n'étant qu'un maillon de l'outil d'optimisation global, il est nécessaire que son coût de calcul soit très faible. Au vue de la géométrie des pièces

couramment utilisées dans l'aéronautique, une modélisation poutre du problème s'avère pertinente.

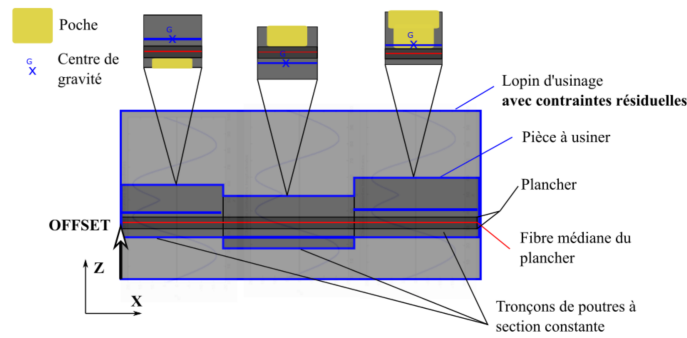


FIGURE 3 – Illustration du modèle poutre retenu pour la simulation légère de l'usinage. Chaque tronçon de section constante est modélisé par un tronçon poutre. Les contraintes résiduelles représentent le chargement du problème, sous forme de moment fléchissant.

En parallèle du développement des outils numériques, le développement d'une méthode d'observation dédiée à l'observation de la déformation d'une pièce pendant son usinage est réalisée.

## 2.3 Experimentation

L'usinage d'une pièce telle que décrite dans la section 2.1 est réalisé à l'aide du machine outil CRENO. L'espace disponible permet en effet d'utiliser un outil de mesure de champs cinématique tel que la corrélation d'image numérique (CIN). Les mesures ainsi obtenues sont dans un premier temps comparées à des mesures MMT.

### 2.3.1 Corrélation d'image numérique

Un outil de mesure de champs cinématiques dédié a été développé afin de prendre correctement en compte l'environnement difficile qu'est celui de l'usinage [7]. Un algorithme de corrélation d'image numérique a ainsi été adapté pour la mesure de la distortion de la pièce sur l'une de ces face. Le montage est illustré figure 4(a). La formulation du problème est mixte : une CIN globale [6] est utilisée pour prendre en compte les déplacements de solides rigides de la caméra pendant l'usinage, les distortions du système optique ainsi que les problèmes de positionnement de la caméra par rapport à la scène observée ; une CIN locale [5] est implémentée sur le résidu de l'approche globale afin de mesurer les déplacement de la pièce usinée pendant son usinage.

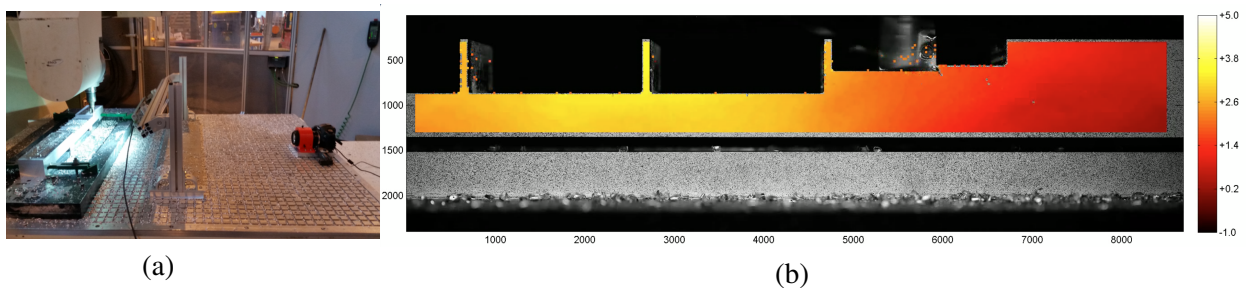


FIGURE 4 – (a) Centre d'usinage; (b) Résultat d'une mesure CIN : champs de déplacement vertical, en pixel. La mesure est réalisée par une approche mixte CIN locale - globale, afin de s'affranchir des contraintes sévères associées à l'utilisation de la CIN dans le contexte de l'usinage.

### 2.3.2 Comparaison avec la MMT

Les mesures CIN permettent une estimation du profil des surfaces. En effet, en supposant la position de l'outil parfaite, la connaissance de la position de la pièce au moment de la réalisation des différents usinages à l'aide de la mesure CIN permet de proposer une estimation de la position des surfaces usinées

une fois la pièce finie. La figure 5 confronte les profils de fonds de poches estimés à partir des mesures CIN avec ceux obtenus directement avec la MMT. Ces résultats confirment la pertinence de l’outil CIN proposé.

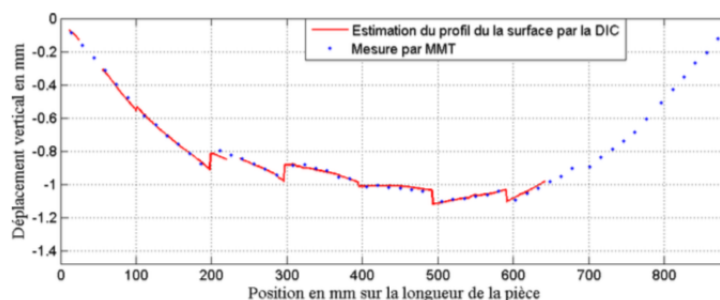


FIGURE 5 – Estimation des profils des fonds de poches à l’aide des mesures CIN (trait continu rouge) et mesures directement obtenues à l’aide de la MMT (points bleu).

### 3 Discussion et conclusion

La réorganisation des contraintes résiduelles s’opérant au sein de la matière lors de l’usinage de pièces aéronautique de grandes dimensions conduit à la distortion de ces pièces une fois débridées. Ces distortions peuvent mener à la non-conformité géométrique des pièces finies et il est donc nécessaire de comprendre ces phénomènes ainsi que leur conséquences. Proposant des solutions pour la simulation ainsi que l’observation précise du processus d’usinage, le projet ANR SIMP-Aéro s’attache à ces deux aspects.

La simulation du processus d’usinage est proposée à l’aide de deux outils numériques aux objectifs différents. Tandis qu’une approche est développée avec le souci constant de la représentation la plus complète de l’usinage, la seconde se veut quant à elle la plus légère possible. Nous verrons que les résultats de ces deux approches sont du même ordre de grandeur. De cette manière, les résultats de l’analyse fine permettent de valider l’analyse rapide.

Les cartes de déplacements obtenues à l’aide de l’outil CIN, validées à l’aide d’une mesure MMT, sont maintenant à confronter avec les résultats des simulations. Les premières comparaisons montrent que les résultats des simulations sont comparable aux observations. Comme attendu, les différences se concentrent aux niveaux des conditions aux limites. Plus de détails seront présentés lors de l’exposé.

#### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l’Agence National pour la Recherche pour son soutien financier dans le cadre du projet SIMP-AERO N° ANR-15-CE10-0005-01.

#### Références

- [1] S. Hassini. *Qualification multi-critères des gammes d’usinage : application aux pièces de structure aéronautique en alliage Airware*. PhD thesis, Ecole Doctorale des Sciences pour l’ingénieur, 2015.
- [2] X. Cerutti. *Numerical modelling and mechanical analysis of the machining of large aeronautical parts : Machining quality improvement*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014.
- [3] X. Cerutti and K. Mocellin. Parallel finite element tool to predict distortion induced by initial residual stresses during machining of aeronautical parts. *International Journal of Material Forming*, 8(2) :255–268, 2015.
- [4] P. Rambaud and K. Mocellin. New numerical approach for the modelling of machining applied to aeronautical structural parts. In *AIP Conference proceedings*, volume 1960, 070022, 2018.
- [5] Michael A Sutton, Jean José Orteu, and Hubert Schreier. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements : Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer, 2009.
- [6] G. Besnard, F. Hild, and S. Roux. Finite-element displacement fields analysis from digital images : application to Portevin-Le Châtelier bands. *Experimental Mechanics*, 46(6) :789–803, 2006.
- [7] G. Rebergue, B. Blaysat, H. Chanal, and E. Duc. Dedicated Global DIC to study the global behavior of a workpiece during its milling. In *Photomechanics - Toulouse, France*, 2018.