



HAL
open science

Reconstruction 3D d'outils coupants pour le contrôle géométrique des fraises et la modélisation thermomécanique du fraisage

Michaël Fontaine, Laurence Lambert-Campagne, Aurélien Maurel-Pantel

► **To cite this version:**

Michaël Fontaine, Laurence Lambert-Campagne, Aurélien Maurel-Pantel. Reconstruction 3D d'outils coupants pour le contrôle géométrique des fraises et la modélisation thermomécanique du fraisage. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391373

HAL Id: hal-03391373

<https://hal.science/hal-03391373v1>

Submitted on 21 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.

Reconstruction 3D d'outils coupants pour le contrôle géométrique des fraises et la modélisation du fraisage

M. FONTAINE ^a, L. LAMBERT-CAMPAGNE ^b, A. MAUREL-PANTEL ^a

a. Institut FEMTO-ST, Département de Mécanique Appliquée, 24 rue de l'épître, 25000 Besançon
b. GIP-INSIC, 27 rue d'Hellieule, 88100 Saint-Dié-des-Vosges

Résumé :

Les moyens d'ingénierie inverse sont actuellement performants pour le contrôle et la re-conception de pièces de formes complexes. L'idée est ici de mettre en œuvre des moyens de digitalisation et de reconstruction géométrique afin de contrôler la géométrie réelle des outils de coupe complexes comme les fraises et d'utiliser les modèles reconstruits pour la modélisation numérique de l'usinage. On s'intéresse donc ici à la méthodologie spécifique à employer pour reconstruire des modèles 3D de fraises réelles et des exemples d'applications sont donnés et illustrés dans le domaine de l'optimisation du fraisage (qualification des outils, modélisation analytique et par éléments finis).

Abstract :

Some reverse engineering methods are actually efficient to control and re-design parts presenting complex forms. The idea is here to use existing digitizing and 3D reconstruction tools in order to check the real geometry of complex cutting tools such as mills, and to use the obtained reconstructed models for the numerical modelling of machining. We focus here on a specific methodology developed to rebuild 3D mills models and some examples of applications are presented in the field of milling process optimisation (cutting tools qualifying, analytical modelling and FE modelling).

Mots clefs : Reconstruction 3D, Outils coupants, Fraisage, Modélisation thermomécanique

1 Introduction

L'ingénierie inverse est une approche de conception et de fabrication permettant de travailler à partir du produit fini afin de remonter le processus de fabrication pour redéfinir les pièces et les opérations associées voire pour reproduire des pièces à l'identique. Les outils de topométrie et digitalisation 3D associés aux logiciels de Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur permettent maintenant de récupérer et d'analyser la géométrie réelle d'objets en trois dimensions avec une précision de positionnement inférieure au dixième de millimètre. Le développement de logiciels de traitements de nuages de points et de surfaces très puissants a ouvert encore de nouvelles possibilités quand au traitement des données et à la reconstruction de modèles surfaciques. Les applications sont considérables et de nombreux travaux émergent pour le contrôle, la re-conception et le prototypage de pièces mécaniques en particulier dans les domaines de pointe comme le médical [1] ou l'aéronautique [2].

Le domaine des procédés de fabrication lui-même peut tirer un grand profit de ces technologies car les formes complexes de certains outils limitent l'emploi de méthodes de métrologie traditionnelles souvent très destructives, fastidieuses et limitées en termes d'analyse géométrique globale. Cet article présente ainsi une méthodologie de digitalisation et de reconstruction surfacique afin de contrôler la géométrie réelle des outils de coupe complexes et d'utiliser les modèles reconstruits pour la modélisation numérique de l'usinage. L'approche est appliquée ici au cas des fraises en carbure monobloc et l'utilisation des modèles reconstruits est illustrée par des exemples de qualification géométrique des outils, de validation d'un modèle géométrique analytique et d'adaptation et d'intégration dans un modèle par éléments finis du fraisage.

2 Reconstruction 3D et contrôle géométrique des outils de coupe

2.1 Méthode de mesure

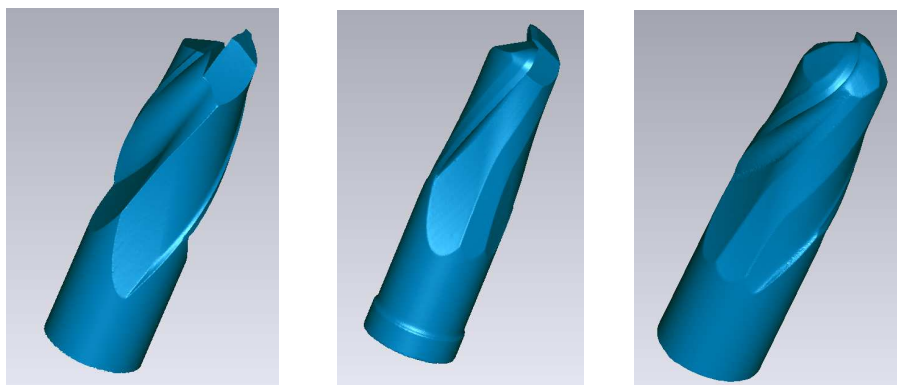
Pour digitaliser les outils de coupe, un système de mesure topométrique 3D OptoTOP-HE de Beuckmann a été utilisé. Ce dispositif fonctionne par triangulation optique et projection de franges, codage de lumière et analyse d'images. Son principe repose sur l'analyse par effet de Moiré de la déformation d'un réseau de lumière blanche projetée sur la pièce. La caméra CCD capte l'image de l'objet, puis la projection d'une séquence de code de GRAY et de plusieurs images de franges à décalage de phase connu afin de déterminer pour chaque point la différence de hauteur avec précision. Le capteur utilisé est de type optoTOP, OT565 modèle HE50 offrant un volume de mesure de 44x38x20. Il est constitué d'un projecteur avec un motif sinusoïdal 128 lignes et une lampe halogène, d'une caméra haute résolution connectée à un ordinateur via une interface IEEE1394 et de deux pointeurs lasers. La résolution de digitalisation est 1280 x 1024 pixels avec 128 x 16 bits valeurs de phase. Le temps d'exposition et le gain de la caméra sont contrôlés par le logiciel OPTOCAT avec la fonction ABSBRIGHT (valeur sans dimension entre 0 et 2047). Les spécifications de l'optique utilisé sont regroupées dans le **tableau 1**.

Spécification de l'optique		
Diagonale de l'image	[mm]	50
Résolution X, Y	[μm]	30
Résolution limite (Z)	[μm]	1
Bruit (Z)	[μm]	± 5
Précision de détection	[μm]	± 7

Tableau 1 : Spécification de l'optique HE50.

2.2 Méthodologie (fonctions logiciel, calage ...)

Trois fraises ont été numérisées : une fraise cylindrique 2 tailles, une fraise rayonnée en bout et une fraise hémisphérique (dite boule). Pour chacune d'elles, plusieurs vues ont été effectuées (une vingtaine de vues sont nécessaires pour une description complète de l'objet). Le raccordement des vues les unes par rapport aux autres s'est effectué par l'intermédiaire d'un support qui nous a permis de relier les vues les unes par rapport aux autres de manière à minimiser les erreurs de recalage. La précision de raccordement des vues après optimisation se situe à 0,0069 mm. La **figure 1** représente les modèles obtenus après numérisation et traitement des différents nuages de points. Une limite est à noter sur la récupération des arêtes vives. En effet, ces informations ne sont pas obtenues par la numérisation mais par retraitement du nuage de points issu de la digitalisation. Bien qu'on ait une incertitude sur la position de celles-ci, la numérisation a permis une analyse détaillée de l'outil d'un point de vue géométrique.



Fraise cylindrique 2 tailles

Fraise rayonnée

Fraise Hémisphérique

FIG. 1 – Modèles issus d'une phase de numérisation de trois fraises (traitement du nuage de points effectué).

Ensuite, une comparaison 3D a été effectuée entre chaque modèle issu de la numérisation et le modèle CAO associé. Dans cet article, nous présentons le cas de la fraise à boule. La **figure 2** représente la comparaison tridimensionnelle et une coupe par le plan A entre le modèle numérisé et le modèle CAO associé fourni par le fournisseur de la fraise hémisphérique.

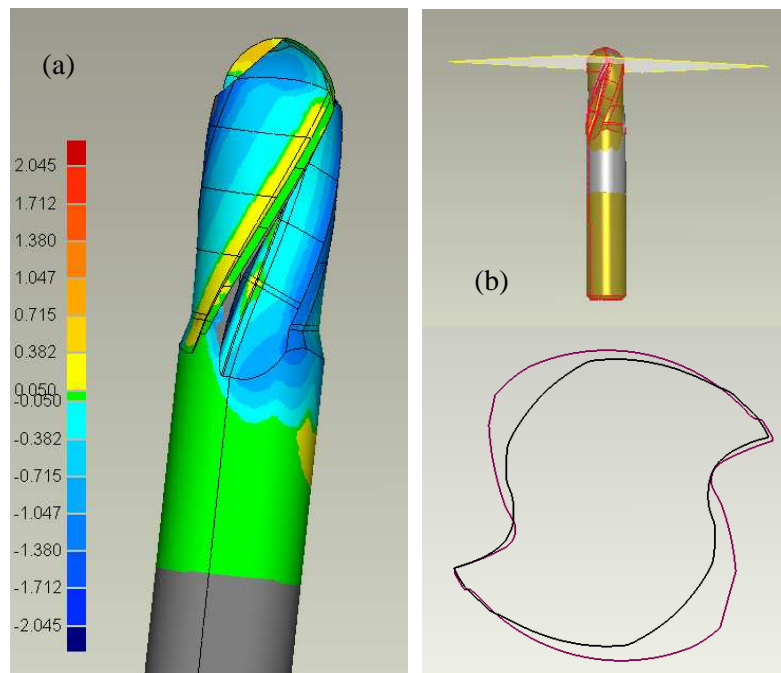


FIG. 2 – Comparaison tridimensionnelle entre le modèle numérisé et le modèle CAO (a). Coupe de l'alignement entre les deux modèles (b).

Cette comparaison a permis de mettre en évidence des différences géométriques entre la fraise (numérisée) et le modèle CAO fourni par l'entreprise, en particulier sur les goujures. Ceci met en évidence les écarts entre les modèles de départ issus du bureau d'étude et les outils réellement produits. On constate ici que malgré les modifications sur les goujures, un bon respect de la position des arêtes de coupe et des angles associés est préservé.

3 Application à la modélisation analytique du fraisage

3.1 La modélisation géométrique

La simulation numérique de l'usinage se fait principalement par deux types d'approches différentes et complémentaires, la modélisation analytique d'une part et la modélisation utilisant la méthode des éléments finis d'autre part. Les modèles analytiques sont utiles pour prédire des grandeurs liées à l'usinage comme les efforts de coupe avec un temps de calcul réduit ce qui permet de simuler des trajets réels d'outils et de réaliser des études paramétriques. L'approche par éléments finis permet d'obtenir d'avantage de données de sortie mais s'avère plus gourmande en temps CPU et est ainsi réservée pour l'instant à des études qui sortent des hypothèses fortes des modèles analytiques. Des travaux récents montrent néanmoins que la modélisation analytique du fraisage peut être physique et prédictive [3] et que la simulation du fraisage par éléments finis est possible et prometteuse [4].

Un modèle analytique du fraisage nécessite un modèle géométrique adapté et suffisamment fidèle à la réalité afin de définir correctement la position des arêtes de coupe et les angles influents associés. La géométrie globale définie est généralement décomposée en strates afin de définir des arêtes de coupe élémentaires au niveau desquelles les grandeurs physiques telles que les efforts ou les températures peuvent être évaluées [5]. Les informations limitées disponibles sur la géométrie des fraises et la difficulté de fabrication des outils qui impose des modifications vis-à-vis des modèles d'origines font que la reconstruction 3D s'impose comme le meilleur moyen de vérifier la pertinence des descriptions géométriques nécessaires à la modélisation.

3.2 Comparaison entre données fournies et outil réel

Une fois le nuage de points acquis et traité (la reconstruction surfacique n'étant pas nécessaire ici), il est possible d'analyser l'outil sous tous les angles et ainsi de vérifier les grandeurs clés tout au long des arêtes de coupe. Ainsi, la **figure 3** présente un outil rayonné (rayon de la partie torique $r = 2,5$ mm) de diamètre 12 à deux dents en carbure de tungstène digitalisé et découpé par des plans perpendiculaires à l'axe afin de vérifier les angles de coupe et de dépouille radiaux à différents niveaux de l'outil. La **figure 4** montre les résultats de ces relevés comparés aux plages de valeurs annoncées dans le catalogue du fournisseur.

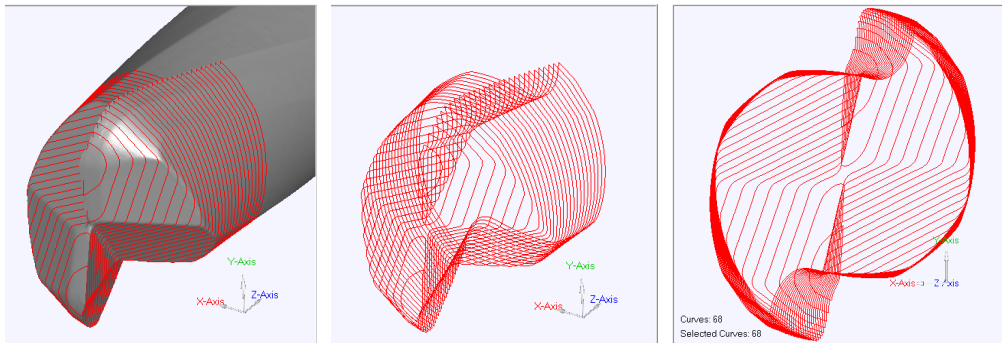


FIG. 3 – Tracé de courbes enveloppes à partir d'un découpage par plans parallèles (fraise rayonnée).

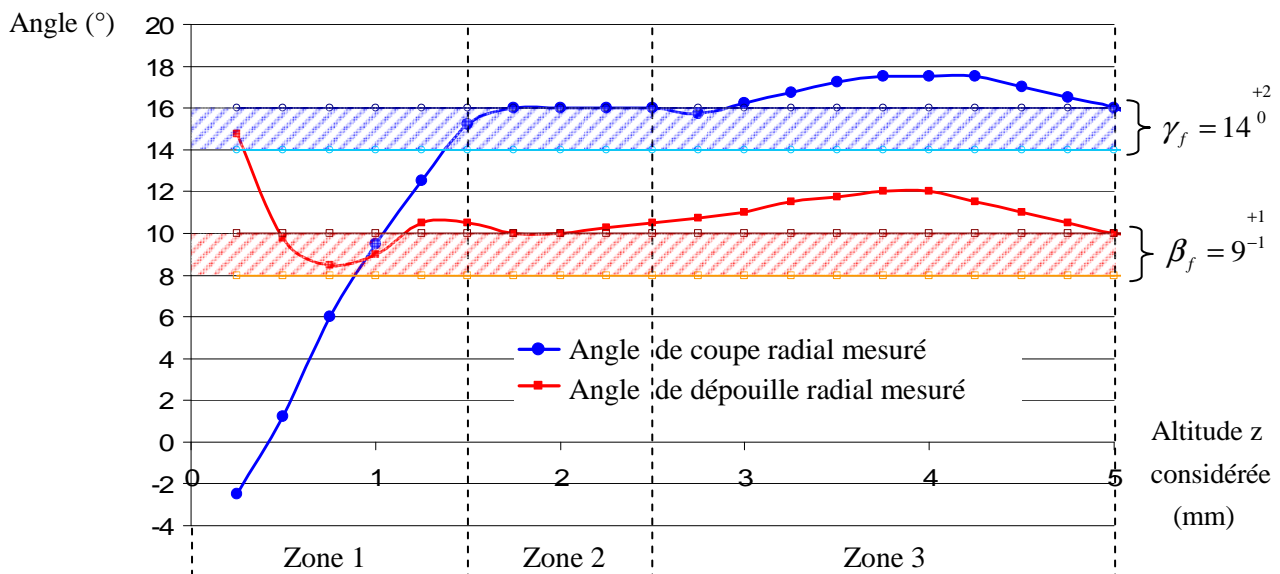


FIG. 4 – Angles radiaux moyens mesurés pour chaque plan de découpage considéré ($z = 0$ en bout d'outil) et plages de valeurs indiquées par le fournisseur.

Les résultats ci-dessus montrent clairement que les plages indiquées sont peu respectées le long de l'outil. Trois zones très distinctes sont observables. La zone 1 correspond au bout d'outil et les opérations de reprise des arêtes de coupe tendent à imposer des angles de coupe radiaux faibles voire négatifs et des angles en dépouille élevés ce qui permet d'améliorer la résistance des dents mais qui éloignent les valeurs de la zone témoin. Les valeurs sont en outre très différentes d'une dent à l'autre sur le premier millimètre en raison de la dissymétrie imposée afin de permettre la coupe au centre (cet écart n'apparaît pas ici car il s'agit de valeurs moyennes). Dans la zone 2, les angles s'équilibrent autour des valeurs maximales prévues ce qui permet de garantir ces angles avec un peu d'usure en dépouille (qui tend à diminuer les angles de coupe et de dépouille localement). La zone 3 correspond à une zone peu utilisée pour l'usinage avec ce type d'outil (zone au dessus de la partie torique) mais nous pouvons remarquer une hausse des angles ce qui garanti en utilisation normale un meilleur dégagement des copeaux vers le haut de l'outil et ainsi en dehors de la zone usinante.

Un modèle analytique basé sur les valeurs témoins fournies s'éloignerait donc de son objectif de prédiction dans la zone 1 (0 à 1,5 mm) en particulier au niveau de l'angle de coupe qui est critique pour des modèles classiquement basés sur une déformation par cisaillement. Ce constat est d'autant plus pertinent que c'est précisément cette zone qui est généralement utilisée pour usiner.

4 Application à la modélisation par éléments finis du fraisage

4.1 Modélisation

Le modèle par éléments finis présenté ici a été créé dans le logiciel de calcul LS-Dyna[®]. Comme l'usinage est intrinsèquement un procédé de mise en forme à grande vitesse caractérisé par de grandes déformations localisées et de fortes contraintes dynamiques, un schéma de résolution explicite a donc été adopté et notre choix s'est naturellement tourné vers un logiciel commercial LS-Dyna[®]. Les résultats de la simulation du point de vue des efforts de coupe ont été validés lors d'une précédente étude [5].

Dans le modèle éléments finis, une fraise deux tailles $\varnothing 12$ mm et une pièce brute d'acier inoxydable 304L ont été modélisées. Ces deux éléments nécessitent de prendre des précautions importantes lors de leur maillage, en effet de la qualité du maillage dépendra la bonne formation du copeau, la qualité des résultats obtenus sur les efforts de coupe et la convergence du calcul. Dans cette simulation, la fraise est considérée comme un composant rigide, le modèle s'appuie sur une modélisation lagrangienne utilisant une formulation explicite. Dans ce modèle, un critère de rupture des éléments est introduit pour se mettre dans les conditions de la formation du copeau, il est basé sur une valeur critique de la déformation plastique ($\epsilon_r = 80\%$). Le frottement est basé sur une loi de Coulomb ($\mu = 0,7$). Le comportement du matériau est défini par une loi de Johnson-Cook. Le temps de calcul est d'environ 5 jours pour un tour de fraise sur une station de calcul équipée de huit processeurs et de 64 Go de mémoire vive.

4.2 Maillage de la fraise

Dans la simulation numérique du fraisage, une des difficultés consiste à intégrer de façon simple une représentation géométrique fidèle de l'outil. Il est à noter en effet que de nombreux travaux aussi bien en tournage et en fraisage ont montré l'importance de la géométrie de l'outil sur les phénomènes du procédé et notamment les effets sur les efforts de coupe. L'approche la plus simple consiste à utiliser les modèles CAO créés en bureau d'étude par les fabricants d'outils. Mais le problème de ces modèles est l'apparition de surfaces complexes ou élémentaires de tailles très différentes ainsi que des enchaînements de surfaces complexes. Sur la **figure 5** les sites problématiques pour les maillages professionnels ont été illustrés, il faut en effet comprendre que lorsque l'un de ces sites critiques apparaît, le mailleur a tendance à réaliser des éléments très petits pour décrire la zone, or dans un algorithme explicite cet élément fait diverger le temps de calcul de la simulation. La solution consistant à simplifier le modèle CAO n'est pas satisfaisante. C'est donc en ce sens que la reconstruction des fraises par mesure directe est intéressante, car elle permet d'obtenir une seule surface enveloppe de la fraise bien plus facile à mailler avec un logiciel quelconque, qui est de plus fidèle à l'outil utilisé lors de l'opération d'usinage simulée.

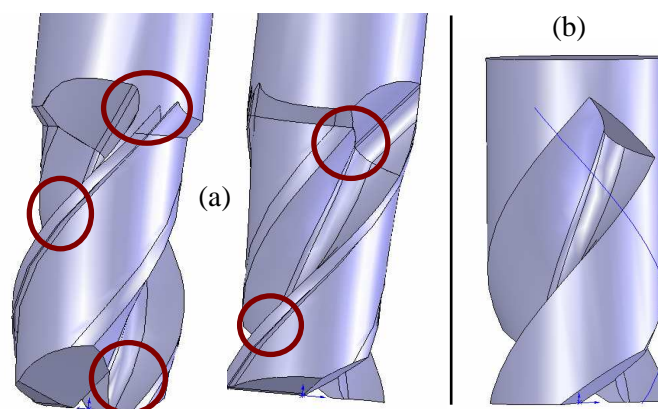


FIG. 5 – Modèles CAO de la fraise deux tailles considérée : (a) modèle complet avec les zones critique pour les maillages actuels, (b) modèle simplifié mieux adapté à l'opération de maillage.

4.3 Résultats de la simulation

Les résultats de la simulation réalisés avec la fraise fournie et reconstruite sont présentés à la **figure 6**. Deux étapes de l'usinage d'épaulement en configuration d'opposition sont présentées, une où la fraise est dans la matière et l'autre à la sortie de la matière avec éjection du copeau dans le sens de l'avance. Des efforts de coupe numériques sont extraits de cette simulation et comparés à des valeurs expérimentales [4]. Les efforts numériques obtenus présentent la forme prévisible de l'engagement d'un outil rigide en configuration d'opposition, la simulation surestime pour l'instant les efforts mais seulement une erreur de 20% est observée.

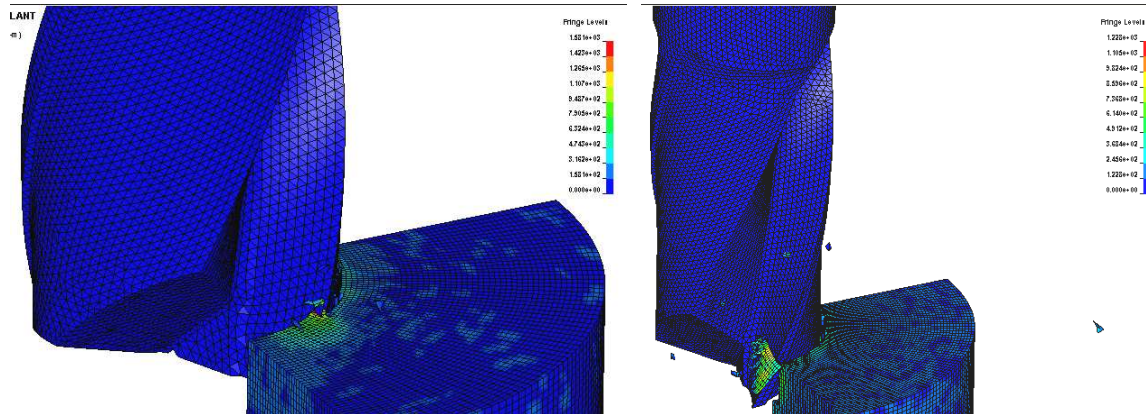


FIG. 6 – Contraintes de von Mises au cours de l'opération de fraisage avec une fraise reconstruite.

En conclusion, la simulation du fraisage est complexe, un premier modèle semble disponible mais des travaux sont encore nécessaires pour aboutir à un outil souple et rapide d'utilisation. Néanmoins d'intéressantes perspectives sont apparues et sont encore en cours de développement [6]. La méthode de reconstruction des outils trouve là toute sa place et pourrait bien être un outil performant dans le futur pour mettre en place des études plus détaillées et automatisées.

5 Conclusion

La méthodologie de digitalisation et de reconstruction 3D présentée ici permet donc la qualification géométrique des outils de coupe, la vérification d'angles spécifiques à une approche technologique ou de modélisation analytique, ainsi que le maillage direct de l'outil en vue d'une modélisation par éléments finis. Les informations récoltées par cette approche d'ingénierie inverse sont donc au cœur des préoccupations des industriels usieurs ou fabricants d'outils ainsi que des débats académiques autour des problématiques de modélisation prédictive. L'efficacité de cette méthode en fait un outil incontournable pour l'optimisation des opérations d'usinage au sens large.

Références

- [1] Rudolph H., Luthardt R., Walter M., Computer-aided analysis of the influence of digitizing and surfacing on the accuracy in dental CAD/CAM technology, *Computers in Biology and Medicine*, 37, 579 – 587, 2007.
- [2] Javidrad F., Rahmati R., An integrated re-engineering plan for the manufacturing of aerospace components, *Materials and Design*, 30, 1524–1532, 2009.
- [3] Fontaine M., Devillez A., Moufki A., Dudzinski D., Predictive force model for ball-end milling and experimental validation with a wavelike form machining test, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 367-380, 2006.
- [4] A. Maurel-Pantel, G. Michel, S. Thibaud, M. Fontaine, J.C. Gelin, 3D fem simulations of milling on a 304L stainless steel, *Metal Forming Conference 2008, Steel Research International Journal*, 79, vol. 2, 2008.
- [5] Fontaine M., Devillez A., Dudzinski D., Efficient geometrical description for modelling of milling operations, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2, 186-205, 2007.
- [6] Maurel A., Fontaine M., Thibaud S., Michel G., Gelin J.C., FEM Modelling and Experiments of Milling Performed to Identify 304L Stainless Steel Material Parameters, *10th CIRP Workshop on Modelling of Machining Operations, Sicily Italy*, 2007.