

Caractérisation de bavures lors du micro-fraisage d'alliages de Nickel-Titane

R. PIQUARD^{ab}, A. D'ACUNTO^b, D. DUDZINSKI^b

a. Institut FEMTO-ST Département de Mécanique Appliquée, 24 rue de l'épitahe, 25000 BESANCON

b. LEM3, UMR CNRS 7239, 4 rue Augustin Fresnel, 57070 METZ

Résumé :

10 Le micro-fraisage est souvent défini comme une homothétie du fraisage conventionnel à des outils dont le diamètre n'excède pas 1 mm. Or, les géométries de l'outil que ce soit pour la partie active ou la forme globale sont très différentes des outils conventionnels, soulevant des problématiques propres à l'échelle d'étude. A ceci s'ajoute le fait que le micro-fraisage peut s'appliquer à des matériaux particuliers comme les alliages à mémoire de forme ou superélastiques dans le domaine du biomédical. L'étude proposée porte sur la formation de bavures lors du fraisage d'épaule pour deux alliages Nickel-Titane (NiTi) biocompatibles. L'approche par plan d'expériences a été utilisée pour cette étude. Elle a permis de mettre en évidence l'influence de différents paramètres sur la formation de bavure lors du micro-fraisage d'alliages de NiTi. Ces paramètres concernent les conditions de coupe ainsi que l'état métallurgique de l'alliage NiTi. Les bavures ont été observées et mesurées (hauteur, largeur et épaisseur) à partir d'images obtenues au MEB, aux microscopes confocal et optique. Les résultats issus de l'analyse de la variance montrent que la formation de bavures est largement influencée par l'avance à la dent et par l'engagement radial. Il est à noter que les dimensions des bavures sont de l'ordre de l'engagement de l'outil dans la matière et qu'il est souhaitable de les réduire. Une augmentation de l'avance par dent ou/et une diminution de l'engagement radial permettent de diminuer significativement la hauteur et la largeur des bavures. L'approche expérimentale proposée a permis d'examiner la formation de bavures en micro-fraisage et d'étudier l'usinabilité des alliages de NiTi superélastique ou à mémoire de forme.

Abstract:

30 The top-down approach from milling to micro-milling (end mills smaller than 1mm of diameter) is often used to define cutting conditions. Unfortunately geometries either for the active part or the overall shape are quite different from conventional tools, leading to inexistent problems at the macro-scale. Moreover, micro-milling can be used on particular material such as Shape Memory alloys or pseudo-elastic materials in biomedical domain. This study focuses on burr formation during shoulder milling for two biocompatible NiTi alloys. Design of experiment is used to highlight the influence of various parameters (cutting parameters and material phases) on the burr formation in micro-milling NiTi alloys. Burrs were observed and measured using confocal, optical and electronic microscopy and tend to be as large as shoulders dimensions. Analysis of Variance emphasizes that the larger the feed per tooth and the smaller the width of cut are, the smaller the top burr is. The proposed experimental approach gave the opportunity to study burr formation in micro-milling and the machinability of alloys or superelastic NiTi shape memory.

Mots clefs : Bavures, Micro-fraisage, Alliages à Mémoire de Forme

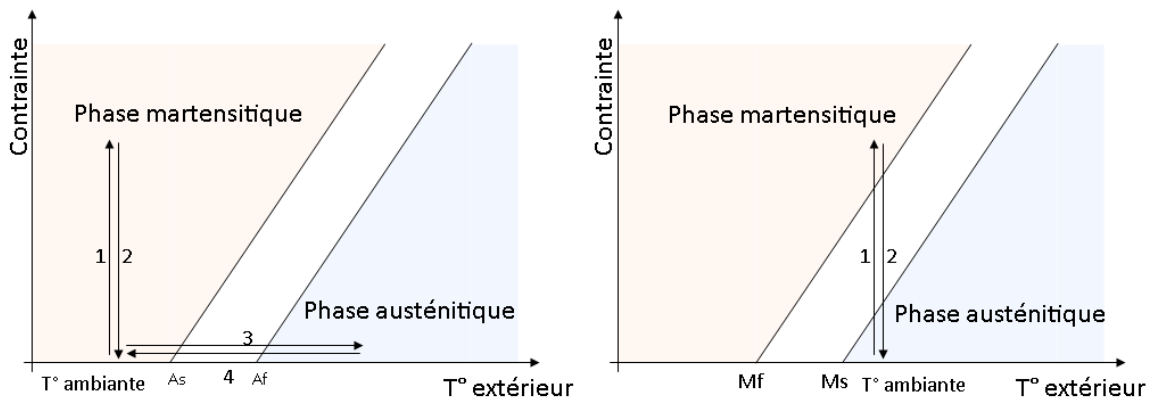
1 Introduction

40 Le Nickel-Titane (NiTi) est un alliage dit à mémoire de forme (AMF). Cet alliage est biphasé avec une composition équimolaire en nickel et en titane (entre 50 et 51%_{at} de nickel). Ce matériau a une tenue à la corrosion équivalente à un acier inoxydable austénitique et a une très bonne biocompatibilité (peu de rejet par les tissus humains). Les alliages à mémoire de forme à base titane sont les plus répandus (80% des AMF). La superélasticité (jusqu'à 8% de déformation réversible) et l'effet mémoire simple sens sont les deux propriétés les plus utilisées (75% et 10% respectivement), ils permettent respectivement d'obtenir des dispositifs très flexibles ou des dispositifs pouvant récupérer une forme particulière lors du chauffage. Leur domaine d'utilisation est à 80% dans le biomédical (fraises de dentistes, arc d'appareil d'orthodontie, stents et instruments en chirurgie, etc.). Les propriétés d'usage sont données dans le tableau 1.

TAB. 1 – Propriétés du NiTi [1].

	Masse volumique (g/cm ³)	Module d'Young (GPa)	Limite élastique (MPa)	Coefficient de Poisson	Taille de grain (µm)
Austénite	6.5 g/cm ³	83	195 - 690	0,33	20
Martensite		28 - 41	70 - 140	0,33	30

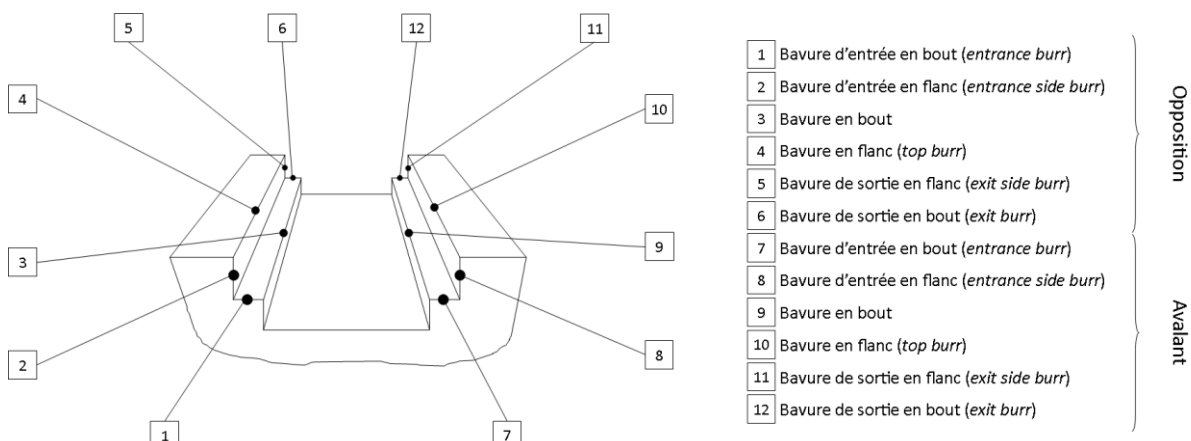
50 Ces propriétés proviennent d'une transformation de phase « martensitique ». Cette transformation se fait à volume constant, elle peut donc être réversible. Elle se produit sous chargement mécanique ou chargement thermique et se définit en général par des températures de début et fin de transformation. Le NiTi superélastique est en phase austénitique. Des bandes de martensite apparaissent dans l'austénite lors de l'augmentation de la contrainte (1) (de la même manière qu'on observe de la plastification dans un autre matériau), puis lors du déchargement, la transformation étant réversible, la configuration initiale est retrouvée (2) (figure 1 droite). Le NiTi à mémoire de forme est en phase martensitique. Lorsque la pièce est déformée plastiquement (1 et 2), une simple augmentation de la température permet de passer de la phase martensitique à la phase austénitique (3), permettant ainsi de retrouver la configuration cristallographique initiale (4) (figure 1 gauche).



60

FIG. 1 – Diagramme contrainte/ température des deux phases de NiTi.

L'étude menée par Weinert & Petzoldt [2] sur l'usinabilité du NiTi montre une tendance du matériau à former des bavures lors de l'usinage (en tournage comme en fraisage). S'agissant du micro-fraisage, Weinert & Petzoldt [3] préconisent en conditions optimales une vitesse de coupe de 47m/min, une profondeur de passe égale au quart du diamètre de fraise, un engagement radial égal à 10% du diamètre et une avance par dent entre 6 et 30 µm. L'utilisation de la lubrification par brouillard d'huile permet de réduire l'usure des outils.



70

FIG. 2 – Localisation des différentes bavures.

Concernant les bavures, leur minimisation voire leur suppression est aussi essentielle qu'à l'échelle macroscopique, ceci est d'autant plus vrai que les dimensions des bavures peuvent être du même ordre de grandeurs que les dimensions de l'entité usinée. La définition mais aussi la description des bavures ne sont pas uniques, elles dépendent fortement du procédé d'usinage, des propriétés mécaniques du matériau ou encore de leur mécanisme de formation [4]. Une description selon leur localisation a été établie [4] et a été enrichie. Elle est donnée dans la figure 2.

2 Approche expérimentale

80 L'objectif principal de ce travail est l'analyse de la formation de bavures (principalement en flanc) en micro-fraisage. Notre étude et analyse porte essentiellement sur une approche expérimentale. Pour cela, un protocole expérimental doit être mis au point. Des essais préliminaires ont permis de valider ce protocole. Enfin, une étude à partir d'un plan d'expériences permet de quantifier les effets des conditions opératoires sur l'usinage du NiTi.

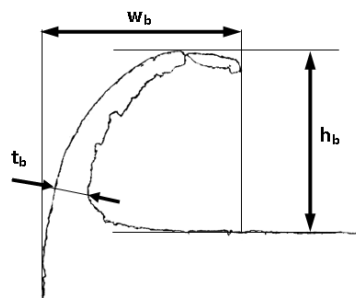


FIG. 3 – Dimensions mesurées sur les bavures.

90 Un plan d'expérience factoriel (2^{6-2}) avec répétition a été élaboré. Les facteurs choisis sont : le mode d'usinage, l'engagement axial, la vitesse de coupe, le matériau, l'avance par dent et l'engagement radial. Les interactions de niveau 1 nous permettent de quantifier l'évolution de la bavure au regard du couple matériau/conditions opératoires (matériau avec f_z , a_p et V_c), de la section du copeau (a_c et f_z) et du couple stratégie/engagement radial. L'interaction de niveau 2 traduit l'évolution de la bavure en fonction des conditions opératoires. La matrice des expériences est donnée par le tableau 2. S'agissant des réponses, nous avons caractérisé les bavures par trois dimensions : hauteur, largeur et épaisseur (figure 3). L'évaluation des réponses a fait l'objet d'un protocole spécifique permettant de les mesurer à l'aide de dispositifs de microscopie optique (traditionnelle et confocale) et électronique (MEB).

TAB. 2 – Matrice d'expérience 2^{6-2} .

N°Exp	Mode d'usinage	Eng. axial	V_c	Matériau	Avance/ dent	Eng. radial
		μm	m/min		μm	μm
1	Opposition	50	30	Austénite	12	100
2	Avalant	50	30	Austénite	6	100
3	Opposition	100	30	Austénite	6	200
4	Avalant	100	30	Austénite	12	200
5	Opposition	50	60	Austénite	12	200
6	Avalant	50	60	Austénite	6	200
7	Opposition	100	60	Austénite	6	100
8	Avalant	100	60	Austénite	12	100
9	Opposition	50	30	Martensite	12	200
10	Avalant	50	30	Martensite	6	200
11	Opposition	100	30	Martensite	6	100
12	Avalant	100	30	Martensite	12	100
13	Opposition	50	60	Martensite	12	100
14	Avalant	50	60	Martensite	6	100
15	Opposition	100	60	Martensite	6	200
16	Avalant	100	60	Martensite	12	200

100

Les différents essais ont été menés sur une MOCN Röders RXP 200DS 5 axes (broche 2kW et 60000tr/min maximum) avec une lubrification minimale ($Q_{\text{huile}} = 1,6\text{mm}^3/\text{min}$). Les outils utilisés sont des micro-fraises de diamètre 0,8 mm (NS Tool MX 225 : 2 dents, angle d'hélice 25°) présentant une rigidité maximale (partie active 0.8 mm).

3 Résultats & Discussions

110

Les bavures en flanc sont très importantes et variables selon les essais en comparaison des autres bavures (figure 4). Ce sont donc ces bavures qui seront principalement étudiées. Après mesures et analyse de la variance (seuil de confiance à 95%), les résultats du plan d'expériences sont présentés dans la figure 5 décrivant uniquement les paramètres et interactions influents par leur effet sur chaque réponse. Cet effet est donné de manière qualitative (valeur en pourcentage) permettant une comparaison aisée des effets sur chaque réponse. Les interactions influentes sont aussi présentées sous forme graphique dans la figure 5. Les équations (1), (2) et (3) donnent une description quantitative des réponses.

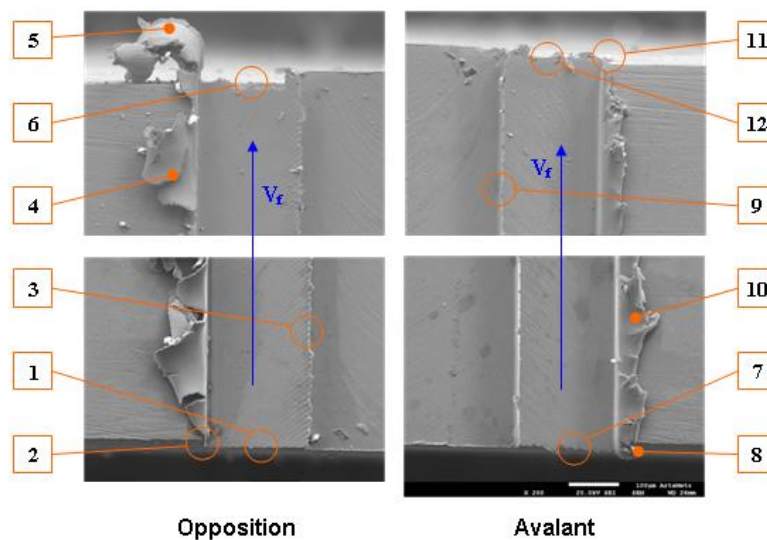


FIG. 4 – Exemple de bavures observées au MEB.

120

Pour la hauteur des bavures h_b dont le modèle est donné par l'équation (1), on remarque que plus de 50% du total des effets des facteurs significatifs est représenté seulement par les effets de l'avance par dent f_z et de l'engagement radial a_e . L'engagement axial influence significativement la hauteur de bavure. L'interaction entre f_z et a_e a un effet significatif. L'effet positif de l'engagement radial (augmentation de la hauteur de bavure) est plus important lorsque f_z est égal à $6\ \mu\text{m}$ qu'à $12\ \mu\text{m}$. L'interaction entre la vitesse de coupe et le matériau usiné est significative : un changement de matériau implique une inversion de l'effet de V_c sur la hauteur de bavure. Cela peut être dû aux propriétés différentes des deux phases du NiTi.

$$\begin{aligned} \widehat{h}_b(\mu\text{m}) = & 63.34 + [+3.72 \quad -3.72] \cdot [a_p] + [+14.53 \quad -14.53] \cdot [f_z] + [-9.47 \quad +9.47] \cdot [a_e] \\ & + [V_c]^t \begin{bmatrix} -4.22 & +4.22 \\ +4.22 & -4.22 \end{bmatrix} [Material] + [a_p]^t \begin{bmatrix} -3.53 & +3.53 \\ +3.53 & -3.53 \end{bmatrix} [Material] \\ & + [f_z]^t \begin{bmatrix} -5.66 & +5.66 \\ +5.66 & -5.66 \end{bmatrix} [a_e] + [Strategy]^t \begin{bmatrix} +4.03 & -4.03 \\ -4.03 & +4.03 \end{bmatrix} [a_e] \end{aligned} \quad (1)$$

Pour la largeur des bavures w_b dont le modèle est donné par l'équation (2), les effets de l'avance par dent f_z et de l'engagement radial a_e représentent quasiment 50% du total des effets. Leur interaction est aussi très fortement influente et son effet a la même tendance que sur la hauteur des bavures. Nous remarquons que le

mode d'usinage est influent ce qui confirme les observations des essais préliminaires sur la morphologie des bavures en flanc.

$$\begin{aligned} \widehat{w}_b(\mu\text{m}) = & 65.87 + [+6.19 \quad -6.19]. [Strategy] + [+3.5 \quad -3.5]. [Material] + [+10.06 \quad -10.06]. [f_z] \\ & + [-10.56 \quad +10.56]. [a_e] + [a_p]^t \begin{bmatrix} -4 & +4 \\ +4 & -4 \end{bmatrix} [Material] + [f_z]^t \begin{bmatrix} -7.25 & +7.25 \\ +7.25 & -7.25 \end{bmatrix} [a_e] \\ & + [Strategy]^t \begin{bmatrix} -2.75 & +2.75 \\ +2.75 & -2.75 \end{bmatrix} [a_e] \end{aligned} \quad (2)$$

130 En ce qui concerne l'épaisseur des bavures t_b dont le modèle est donné par l'équation (3), tous les facteurs ont un effet significatif et seulement l'interaction entre le mode d'usinage et a_e est considérée comme influente. Le facteur le plus influent est le mode d'usinage. Les bavures obtenues en mode avalant sont plus épaisses (h_b) qu'en mode opposition. Une augmentation de la vitesse de coupe tend aussi à obtenir des bavures plus épaisses, contrairement à l'effet de a_p , f_z et a_e . L'interaction entre le mode et l'engagement axial montre que l'augmentation de a_e en mode opposition a peu d'effet sur l'épaisseur de bavure, contrairement au mode avalant où l'effet de a_e diminue h_b de manière non négligeable.

$$\begin{aligned} \widehat{t}_b(\mu\text{m}) = & 7.22 + [-2.22 \quad +2.22]. [Strategy] + [+0.84 \quad -0.84]. [a_p] + [-1.47 \quad +1.47]. [V_c] \\ & + [-1.72 \quad +1.72]. [Material] + [+0.72 \quad -0.72]. [f_z] + [+0.97 \quad -0.97]. [a_e] \\ & + [Strategy]^t \begin{bmatrix} -0.84 & +0.84 \\ +0.84 & -0.84 \end{bmatrix} [a_e] \end{aligned} \quad (3)$$

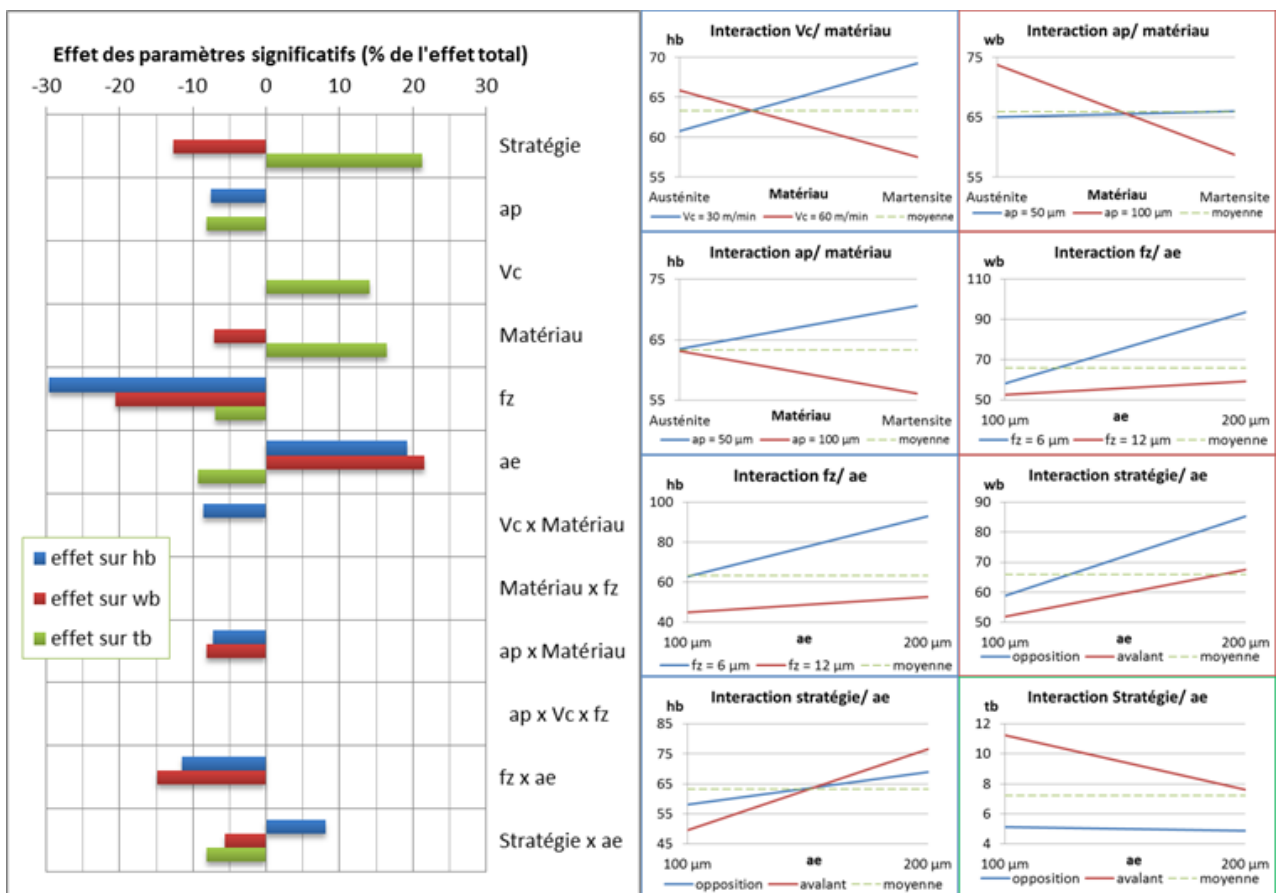


FIG. 5 – Résultats de l'analyse de la variance et graphiques des interactions.

D'après les trois équations représentant le modèle de bavure (h_b , w_b et t_b) et les graphes définis dans la figure 5, les moyennes de hauteur et de largeur sont 10 fois plus grandes que la moyenne de l'épaisseur. L'épaisseur de bavure est activée par l'ensemble des facteurs tant par le matériau (ductilité et super-élasticité) que par le procédé de micro-fraisage (compétition entre labourage et coupe).

Les interactions non significatives indiquent une indépendance entre ces facteurs. S'agissant de la hauteur de bavure et pour les interactions comme le matériau et f_z d'une part, a_p , V_c et f_z d'autre part, ces facteurs sont donc indépendants. Pour la largeur de bavure s'ajoute l'indépendance entre V_c et le matériau. L'épaisseur de bavure montre exclusivement une dépendance entre stratégie et a_c .

150 L'interaction d'ordre 1 entre a_c et f_z exprime la compétition entre ces deux paramètres (section de copeau) sur l'évolution des bavures. L'interaction d'ordre 1 entre stratégie et engagement radial influence la formation de la bavure (pour les trois dimensions).

Nous remarquons que f_z et a_c et leur interaction ont un effet similaire sur la hauteur et la largeur des bavures en flanc. Une augmentation de f_z tend vers une diminution des hauteurs et largeurs de bavures, contrairement à l'augmentation de a_c .

4 Conclusion

Le NiTi étant essentiellement utilisé dans le domaine du biomédical, la présence de bavure est à proscrire. Une caractérisation géométrique de la bavure (h_b, w_b et t_b) est proposée (figure 2). L'expérimentation menée permet d'identifier les facteurs prépondérants à la génération de bavures. Pour minimiser la bavure, il convient dans un premier temps d'avoir une grande avance par dent et un faible engagement radial permettant de réduire essentiellement la hauteur et la largeur de bavure. De plus, un usinage en opposition et à faible vitesse de coupe permet de réduire l'épaisseur de bavure facilitant ainsi l'ébavurage.

Par ailleurs, la minimisation des bavures impacte l'ordonnancement des opérations d'usinage. En l'occurrence, il conviendrait d'usiner les épaulements avant un surfacage du plan supérieur. La bavure en flanc est alors minimisée tandis que des bavures en bout, de moindre dimensions, sont créées [4].

170 Le plan d'expérience donne les orientations sur l'influence des facteurs sur la formation de bavure en flanc mais ne définit pas de modèle de formation de bavure. Il existe des modèles de formation de bavure en flanc en sortie par analogie à la coupe orthogonale. Dans une perspective de modélisation des bavures en flanc, il est nécessaire de développer un modèle de coupe en 3D à l'échelle du micro-usinage (rayon d'acuité d'arête non négligeable) pour observer les effets de bords.

Références

- [1] C. Lebreton, *Alliages à mémoire de forme de type nickel-titane*. Ed. Techniques Ingénieur, 2004.
- [2] K. Weinert and V. Petzoldt, "Machining of NiTi based shape memory alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 378, no. 1, pp. 180–184, 2004.
- [3] K. Weinert and V. Petzoldt, "Machining NiTi micro-parts by micro-milling," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 481, pp. 672–675, 2008.
- [4] J. C. Aurich, D. Dornfeld, P. J. Arrazola, V. Franke, L. Leitz, and S. Min, "Burrs—Analysis, control and removal," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 2, pp. 519–542, Jan. 2009.