

Analyse des configurations d'usinage en 5 axes à la fraise hémisphérique.

D. PRAT^a, G. FROMENTIN^a, G. POULACHON^a, E. DUC^b

a. Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés, LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech Cluny, rue porte de Paris, 71250 CLUNY

b. Laboratoire de Mécanique et Ingénieries, LaMI, IFMA/UBP, Campus des Cézeaux BP265 - 63175 Aubière cedex,

Résumé :

Le fraisage 5 axes en continu est une technique de pointe utilisée pour la réalisation de surfaces complexes. En finition, cette technique repose généralement sur l'emploi de fraises boules ou de fraises hémisphériques. La mise en œuvre de ce type d'opération sur fraiseuse 5 axes, offre la possibilité d'incliner l'outil suivant deux angles. Il en résulte une multitude de configurations géométrique et donc une difficulté de déterminer les paramètres adéquats. L'étude proposée aborde deux problématiques spécifiques au fraisage 5 axes de finition. Le premier point repose sur une analyse géométrique pour la détermination des conditions d'engagement et de travail de l'arête de coupe. Une seconde approche basée sur une analyse cinématique traite du mode d'usinage de la fraise. Cette étude propose donc des critères permettant l'analyse d'une configuration d'usinage 5 axes afin d'aider à une meilleure maîtrise de cette technique.

Abstract :

The 5 axis continuous milling is an advanced technique for free-form surfaces manufacturing. In finishing, this technique uses ball-end mills or hemispherical mills. This type of operation for 5 axis milling allows the possibility to tilt the tool with two different angles. As a consequence, a mass of geometrical configurations exist and establishing accurate parameters is quite difficult. This study deals with two 5 axis milling specific problems in finishing. The first point is based on a geometrical analysis to determine engagement conditions of the cutting edge. The second approach on kinematic analysis deals with the milling strategies of the mill. This study proposes some criteria to analyze a 5 axis milling configuration in order to improve the control of this technique.

Mots clefs : Usinage 5 axes, fraise boule, point de vitesse de coupe nulle, diamètre effectif, mode d'usinage

1 Introduction

La fraise hémisphérique ou fraise boule est un outil de finition privilégié pour l'usinage 5 axes. L'emploi d'une telle fraise impose d'incliner l'axe de la fraise par rapport à la normale locale de la surface à usiner pour éviter que le point de l'arête de l'outil, se trouvant sur l'axe de la broche, ne soit en contact avec la matière à couper (point de vitesse de coupe nulle). Il existe deux pratiques : le travail en 3 axes où les angles de dépinçage vont évoluer en fonction de la géométrie de la surface (avec le risque de travailler avec le point de vitesse de coupe nulle) et le travail en 5 axes continus où l'usineur peut maîtriser constamment les angles de dépinçage. Dans le cas du fraisage 3 axes en bout avec une fraise deux tailles, l'axe de l'outil est colinéaire à l'axe de la normale locale de la surface à usiner. Il y a donc quatre paramètres opératoires à maîtriser : V_c , f_z , a_e , a_p . Dans le cas d'une trajectoire perpendiculaire à la normale locale de la surface, le point de vitesse de coupe nulle n'est pas engagé dans la matière. Le diamètre de coupe est toujours constant, égal au diamètre de fraise, et le mode d'usinage est bien identifié. Dans le cas de l'usinage de finition en 5 axes avec une fraise hémisphérique, il n'en va pas de même : il convient d'ajouter deux angles de dépinçage parmi les conditions de coupe. Les conséquences sont que, fonction de ces six conditions de coupe, le point de vitesse de coupe nulle peut se trouver dans la matière, le diamètre effectif de coupe est variable et la détermination du mode de coupe demande une observation particulière, contrairement au cas de l'usinage en 3 axes. Cette étude a pour objectif de montrer l'influence des deux angles de dépinçage conjointe aux autres conditions de coupe sur le positionnement du point de vitesse de coupe nulle, la valeur des diamètres effectifs et le mode d'usinage.

2 Paramétrage de l'opération de fraisage

Pour progresser dans cette étude, un paramétrage géométrique de la fraise en situation (cf. figure 1) est nécessaire. Dans l'espace pièce, sont considérés :

- Un repère local pièce $R_p[P_g, X_p, Y_p, Z_p]$
- Un repère lié à la fraise $R_f[O, X_f, Y_f, Z_f]$

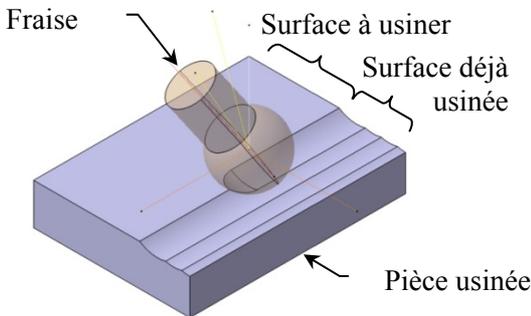


FIG. 1 – Situation.

Le choix est fait ici de prendre l'avance colinéaire au vecteur X_p . L'enveloppe de la fraise est modélisée par une sphère de centre O de rayon r_f . L'axe de la fraise est défini par la droite (O, Z_f). L'orientation de Z_f est donnée par les deux angles de dépinçage β_n et β_f . L'angle β_f est l'angle entre la projection de Z_f dans le plan d'avance (P_g, X_p, Z_p) et le vecteur Z_p . L'angle β_n est l'angle entre la projection de Z_f dans le plan perpendiculaire au plan d'avance (P_g, Y_p, Z_p) et le vecteur Z_p . Dans ces conditions le vecteur Z_f s'exprime dans le repère R_p par :

$$\underline{Z}_f = \frac{1}{\sqrt{1+\tan(\beta_f)^2+\tan(\beta_n)^2}} \cdot \begin{Bmatrix} \tan(\beta_f) \\ -\tan(\beta_n) \\ 1 \end{Bmatrix}_{[R_p]} \quad (1)$$

$$\text{L'angle } \beta_{\text{résultant}} \text{ est déterminé par : } \beta_{\text{résultant}} = \text{ArcTan} \left(\sqrt{\tan(\beta_f)^2 + \tan(\beta_n)^2} \right) \quad (2)$$

Le point O est situé à l'altitude r_f . La surface à usiner (figure 1) est située à l'altitude a_p . La surface déjà usinée (figure 1) est modélisée par des cylindres qui sont les traces successives des passages d'outil. En particulier, la dernière trace laissée par l'outil est celle qui est en cours d'usinage. La passe précédente est décalée de la profondeur de passe radiale a_e . Cette valeur est algébrique :

- a_e positif : la matière est à droite du plan (P_g, X_p, Z_p) dans le sens de l'usinage
- a_e négatif : la matière est à gauche du plan (P_g, X_p, Z_p) dans le sens de l'usinage

3 Analyse géométrique de l'opération

3.1 Le point de vitesse de coupe nulle

Pour couper la matière, une arête de coupe doit avoir une vitesse de coupe non nulle. La vitesse de coupe d'un point M d'une arête de l'outil est définie comme la vitesse du point M de l'arête considérée dans son mouvement par rapport à la broche de la machine. Le mouvement de coupe d'une fraise est toujours un mouvement de rotation, la vitesse de coupe est donc tangentielle à l'enveloppe de la fraise. Une fraise ayant au moins une arête passant par l'axe de rotation a un point de l'arête ayant une vitesse de coupe nulle. La fraise hémisphérique est alors concernée par cet aspect et a donc un point de vitesse de coupe nulle P_{vcn} .

Pour usiner dans de bonnes conditions, il faut choisir des paramètres de coupe ($a_e, a_p, \beta_f, \beta_n$) qui permettent d'éviter que le point P_{vcn} soit dans la matière. Une condition suffisante pour que le point P_{vcn} soit hors matière, est que ce point soit au-dessus de la surface de la matière à usiner (figure 2 (a)). Ce qui se traduit par :

$$\Delta Z > a_p \text{ avec } \Delta Z = r_f \cdot (1 - \cos(\beta_{\text{résultant}})) \quad (3)$$

Une autre condition suffisante est d'observer si le point P_{vcn} est devant ou bien derrière le plan perpendiculaire au plan d'avance ($P_g, \underline{Y}_p, \underline{Z}_p$). Si l'angle β_f est positif (figure 2 (b)) alors le point P_{vcn} est derrière le plan ($P_g, \underline{Y}_p, \underline{Z}_p$) et est donc hors matière. La condition est donc :

$$\beta_f > 0 \quad (4)$$

Si les conditions (3) et (4) ne sont pas vérifiées alors une dernière condition est à tester. C'est la distance entre le point P_{vcn} et l'axe du cylindre de la passe précédente par rapport au rayon de la fraise r_f . Le cylindre est caractérisé par un point O_{ae} de coordonnées $\{0, a_e, r_f\}$ dans $[R_p]$ (figure 2 (c)) et de vecteur générateur \underline{X}_p . La dernière condition est alors :

$$\| \underline{P}_{vcn} O_{ae} \times \underline{X}_p \| < r_f \quad (5)$$

L'opérateur \times est le produit vectoriel entre deux vecteurs.

Si la condition (5) est vérifiée, cela signifie que le point P_{vcn} est dans le volume qui a été usiné à la passe précédente donc il se trouve hors matière. En conclusion, si les trois conditions (3), (4) et (5) sont conjointement fausses alors le point de vitesse de coupe nulle P_{vcn} est situé au contact de la matière à couper. Il convient donc de modifier les conditions de coupe pour dégager ce point de la matière.

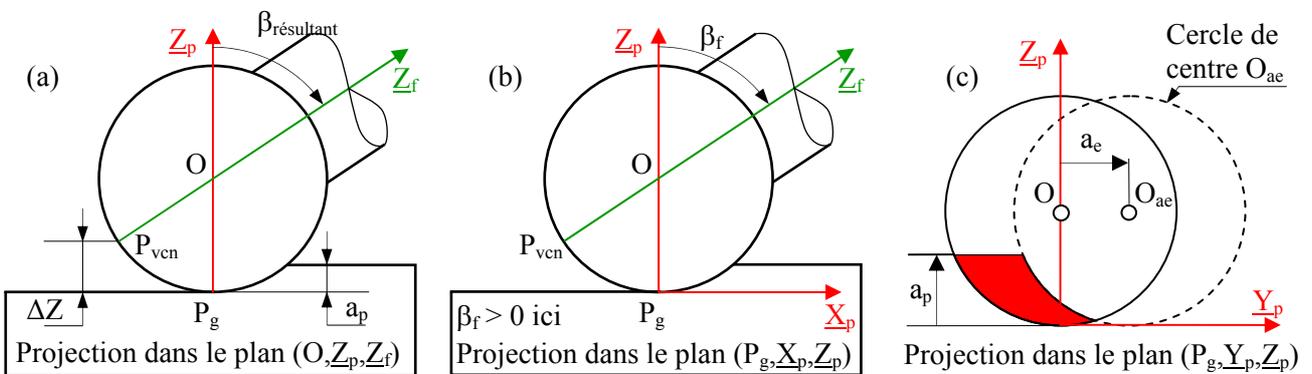


FIG. 2 – Projections.

3.2 Les diamètres effectifs de coupe

Lors de la formation du copeau, l'arête de coupe est en prise avec la matière à couper sur une portion d'arc. La vitesse de coupe de chacun des points de cet arc est différente puisque située sur des diamètres différents. Il convient donc de connaître le plus grand diamètre appelé diamètre effectif maximal et le plus petit diamètre appelé diamètre effectif minimal pour pouvoir caractériser la coupe.

[4] propose de ne retenir qu'un diamètre effectif correspondant au point de l'arête séparant équitablement l'arc entre les points de l'arête coïncidant avec le diamètre effectif minimal et maximal. Cette caractérisation de la coupe occulte par construction, la connaissance du comportement sur toute l'arête en prise avec la matière. C'est pour cette raison que les deux diamètres effectifs seront calculés ici.

L'intersection de la sphère de l'outil (en couleur verte sur la figure 3) avec la pièce à usiner fait apparaître 3 frontières :

- Frontière plan \cap sphère (F_1) : Elle est caractérisée par un cercle de rayon $\sqrt{a_p \cdot (2 \cdot r_f - a_p)}$ compris dans le plan situé à l'altitude $Z_p = a_p$ et est centrée sur la droite (O, \underline{Z}_p) .
- Frontière hémisphère (F_2) : C'est un cercle de rayon r_f de centre O compris dans le plan $(O, \underline{Y}_p, \underline{Z}_p)$.
- Frontière cylindre \cap sphère (F_3) :

Cette dernière frontière est l'intersection entre deux surfaces : la sphère de l'outil (de centre O et de rayon r_f) et du cylindre de la passe précédente. Ce cylindre est de rayon r_f et a_p pour axe $(O_{ae}, \underline{X}_p)$.

L'intersection de ces trois courbes, deux par deux, donne lieu à trois points (P_1, P_2 et P_3) définissant les extrémités des frontières. Le calcul de la distance entre un point M d'une des frontières et l'axe de la fraise (O, \underline{Z}_f) est :

$$distance(M, (O, \underline{Z}_f)) = \| \underline{OM} \times \underline{Z}_f \| \quad (6)$$

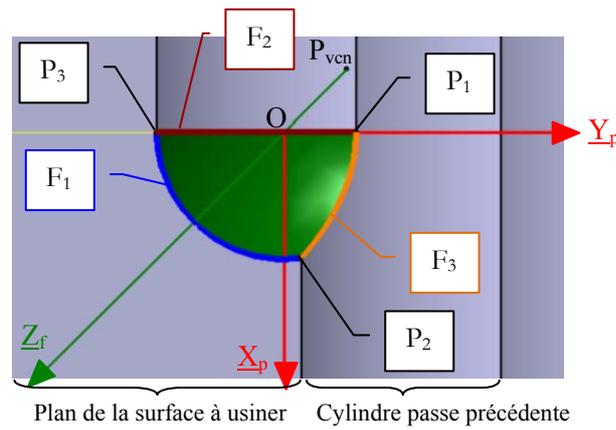


FIG. 3 – Intersection de la sphère de l’outil avec la pièce à usiner.

Pour chaque frontière il faut rechercher les distances maximales et minimales entre la frontière (compris entre les points extrémités) et l’axe de la fraise.

$$\begin{cases} \text{Diamètre}_{\text{effectif Maxi}} = 2 \cdot \text{Maximum}_i \left[\text{distance}_{\text{maximale}} \left(F_i, (O, \underline{Z}_f) \right) \right] \\ \text{Diamètre}_{\text{effectif Mini}} = \text{Si} \left[P_{\text{vcn}} \cap \text{Pièce} = \emptyset, 2 \cdot \text{Minimum}_i \left[\text{distance}_{\text{minimale}} \left(F_i, (O, \underline{Z}_f) \right) \right], 0 \right] \end{cases} \quad (7)$$

Le calcul du diamètre effectif minimal fait apparaître une condition sur la position du point P_{vcn} par rapport à la pièce à usiner : si le point P_{vcn} est hors matière alors le diamètre effectif minimal est deux fois le minimum des distances minimales de chaque frontière, sinon le diamètre effectif est nul lorsque P_{vcn} est dans la matière.

4 Analyse des modes d’usinage

Il existe plusieurs façon de déterminer le mode d’usinage d’une opération de fraisage : soit par l’étude de la variation de l’épaisseur coupée [1], soit par l’analyse cinématique des vitesses de coupe et d’avance. Ce dernier point de vue consiste à déterminer le signe du produit scalaire entre les vecteurs vitesse de coupe et vitesse d’avance, des points appartenant à l’arête au moment de couper la matière. La vitesse de coupe \underline{V}_c est [2] la vitesse du point de l’arête considéré appartenant à l’outil par rapport à la broche :

$$\underline{V}_c = \underline{M}_{[R_p/R_f]}(\beta_f, \beta_n) \cdot \frac{d}{dt} \left[\underline{R}(-\omega \cdot t) \cdot \underline{OM} \right] \quad (8)$$

$\underline{M}_{[R_p/R_f]}(\beta_f, \beta_n)$ est la matrice de changement de base qui dépend des angles β_f et β_n de R_f vers R_p . $\underline{R}(-\omega \cdot t)$ est la matrice de rotation entre l’outil et la broche de la machine : elle dépend du temps t . La vitesse d’avance \underline{V}_f est [2] la vitesse du point de l’arête considéré appartenant à la broche par rapport à la pièce.

$$\underline{V}_f = V_f \cdot \underline{X}_p \quad (9)$$

Après analyse du produit scalaire des deux vecteurs précédents, il apparaît que la frontière pour lequel le produit scalaire est nul est un cercle de rayon r_f de centre O et compris dans le plan $(O, \underline{Z}_f, \underline{X}_p)$. En conclusion, lorsque la matière à couper est à gauche (respectivement à droite) du plan $(O, \underline{Z}_f, \underline{X}_p)$ dans le sens de l’avance, le produit scalaire est positif (respectivement négatif) donc le mode d’usinage est opposition (respectivement avalant).

5 Etude de cas

Afin d’illustrer les trois points de vue précédents, plusieurs configurations d’usinage vont être analysées :

| Configuration | r_f (mm) | β_f (°) | β_n (°) | a_e (mm) | a_p (mm) | $D_{\text{eff max}} [3]$ (mm) | $D_{\text{eff max}} (7)$ (mm) | Mode d’usinage |
|---------------|------------|---------------|---------------|------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| A | 4 | +20 | 0 | +0,2 | 0,5 | 7,02 | 5,30 | Avalant |
| B | 4 | 0 | +20 | +0,2 | 0,3 | 6,28 | 5,39 | Avalant |
| C | 4 | 0 | -20 | +0,2 | 0,3 | 1,63 | 2,92 | Opposition |
| D | 4 | 0 | +20 | -0,2 | 0,3 | 6,28 | 2,92 | Avalant |
| E | 4 | 0 | -20 | -0,2 | 0,3 | 1,63 | 5,39 | Opposition |

TAB. 1 – Configurations de l’étude.

Le mode d’usinage est celui déterminé par le développement du chapitre précédent.

5.1 Comparaison des diamètres effectifs de coupe avec les formules existantes

Il existe dans la littérature des formules permettant de déterminer les diamètres effectifs de coupe dans les cas où la fraise est inclinée soit dans plan d'avance soit dans le plan perpendiculaire. Par exemple [3] propose en fonction des angles :

$$D_{eff \max \beta_f} = 2 \cdot r_f \cdot \sin \left(\beta_f + \text{ArcCos} \left(\frac{r_f - a_p}{r_f} \right) \right) \text{ avec } \beta_f > 0 \quad (10)$$

$$D_{eff \max \beta_n} = 2 \cdot r_f \cdot \sin \left(\beta_n + \text{ArcCos} \left(\frac{r_f - a_p}{r_f} \right) \right)$$

La configuration A (tableau 1), montre une différence de diamètre effectif calculé selon la référence [3] et selon la formule (7) de 32 % par rapport à la formule (7). Cette différence s'explique par le fait que les diamètres effectifs ne se trouvent pas toujours dans le plan d'inclinaison de l'axe de l'outil. La figure 4 (b) illustre que les diamètres effectifs maximaux et minimaux ne sont pas coplanaires avec le plan (O, X_p, Z_f) alors que c'est une hypothèse de base pour [3]. La formule (10) donne un diamètre effectif s'appuyant sur le point P'_2 (en jaune sur la figure 4 (a)) alors que ce point n'est pas au contact de la matière à couper. Le développement du chapitre 3.2 montre un diamètre effectif correspondant au point P_2 (en rouge).

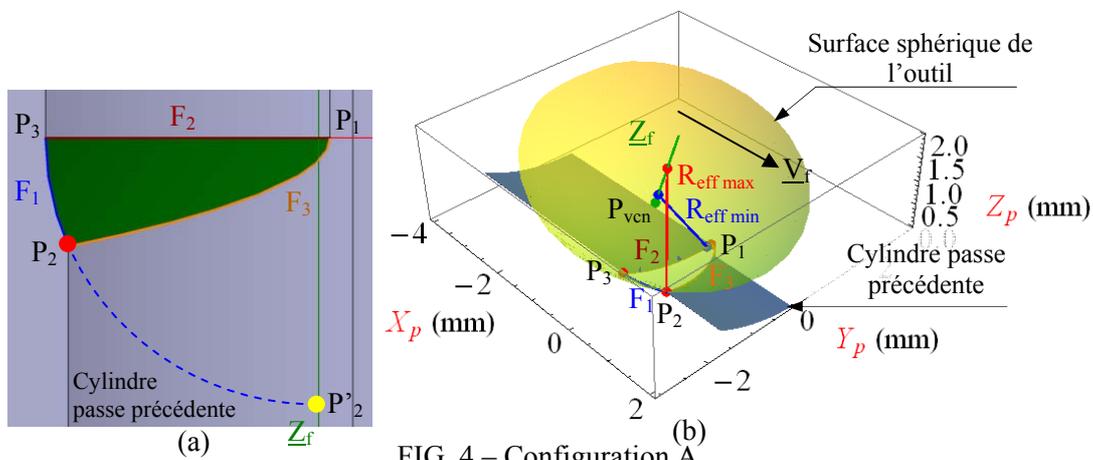


FIG. 4 – Configuration A.

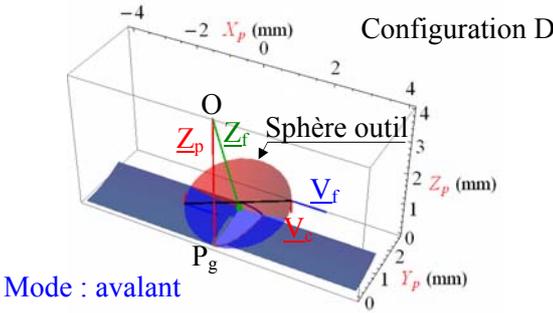
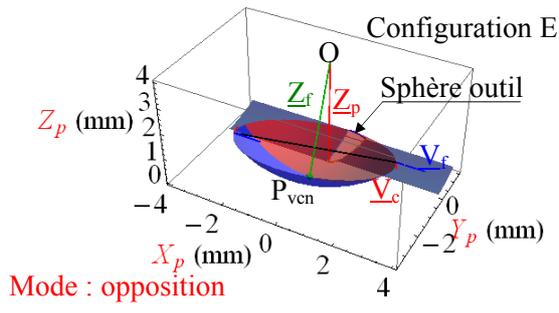
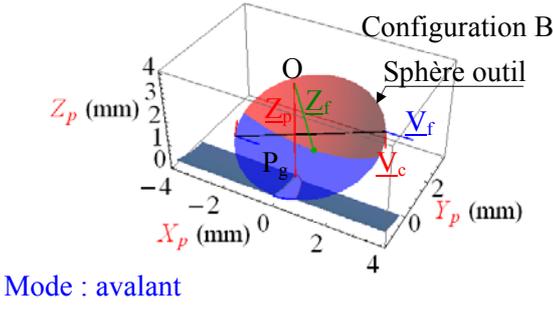
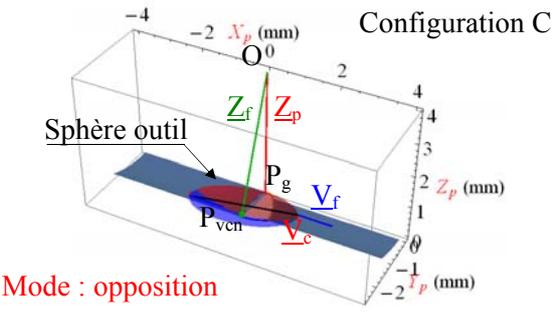
La recherche d'une formulation analytique exacte des diamètres effectifs dans le plan (O, Z_p, Z_f) n'est pas possible dans le cas général car la détermination des diamètres effectifs de coupe est un problème en 3 dimensions ne pouvant pas dans le cas général être réduit à une approche plane.

L'observation des différentes orientations de l'axe de la fraise montre que :

- Les diamètres effectifs maximaux correspondent toujours à un des trois points (P_1 , P_2 et P_3) définissant les extrémités des frontières (figure 3).
- Les diamètres effectifs minimaux ne correspondent pas systématiquement à l'un des trois points définissant les extrémités des frontières (figure 3).
- Dans la plupart des cas, l'axe de l'outil, le diamètre effectif maximal et le diamètre effectif minimal ne sont pas coplanaires (figure 4 (b)).

5.2 Comparaison des modes d'usage

Le mode d'usinage, en fraisage 3 axes, est déterminé en étudiant la position de la matière à couper par rapport à la normale à la surface locale, ici modélisée par le signe de la profondeur de passe radiale. Dans le cas de l'usinage en 5 axes, l'angle de dépinçage dans le plan normal à l'avance modifie cette règle.

| | β_n positif (+20°) | β_n négatif (-20°) |
|--|--|--|
| a_c négatif (-0,2 mm) matière à gauche de Z_f | <p>Configuration D</p>  <p>Mode : avalant</p> | <p>Configuration E</p>  <p>Mode : opposition</p> |
| a_c positif (+0,2 mm) matière à droite de Z_f | <p>Configuration B</p>  <p>Mode : avalant</p> | <p>Configuration C</p>  <p>Mode : opposition</p> |

TAB. 2 – Comparaison des configurations.

L'observation du tableau 2 montre que le mode d'usinage est donné par la position de la matière par rapport à l'axe de l'outil : lorsque la matière à couper est à gauche (respectivement à droite) du plan (O, Z_f, X_p) dans le sens de l'avance, le produit scalaire est positif (respectivement négatif) donc le mode d'usinage est opposition (respectivement avalant). Dans les configurations étudiées l'inclinaison β_n vient modifier le mode d'usinage. Ce résultat est cohérent avec la définition du mode d'usinage obtenu par l'analyse de la variation de l'épaisseur coupée en fonction du temps [1].

6 Conclusion

Cette étude montre trois critères d'analyse d'une configuration d'usinage en 5 axes. La position du point P_{vcn} doit être en dehors de la matière à couper. La connaissance des diamètres effectifs permet de maîtriser la plage de vitesse de coupe de l'opération. Le mode d'usinage est bien identifié pour garantir un état de surface homogène sur toute la pièce.

References

- [1] PRAT D., Usinage 5 axes à la fraise hémisphérique : analyse de l'épaisseur coupée et du mode d'usinage. Assises MUGV, Nantes 2008.
- [2] ISO 3002-1. Basic quantities in cutting and grinding. Part 1. Norme ISO. 1982.
- [3] BOUJELBENE M., Etude expérimentale de l'usinage en finition des formes complexes. Application aux moules et outillages. Thèse de doctorat, ENSAM 2002.
- [4] GUILLEMOT N., Prise en compte de l'intégrité de surface pour la prévision de la tenue en fatigue de pièces usinées en fraisage. Thèse de doctorat, ENSC 2010.