



**HAL**  
open science

# Méthodes de prédiction de la qualité de surface en fraisage à grande avance : modélisation semi-analytique ou méthode dexels et impact de la dynamique

Thomas Jacquet, Guillaume Fromentin, Fabien Viprey, David Prat, Philippe Lorong

## ► To cite this version:

Thomas Jacquet, Guillaume Fromentin, Fabien Viprey, David Prat, Philippe Lorong. Méthodes de prédiction de la qualité de surface en fraisage à grande avance : modélisation semi-analytique ou méthode dexels et impact de la dynamique. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, Grenoble, France. hal-04784371

**HAL Id: hal-04784371**

**<https://hal.science/hal-04784371v1>**

Submitted on 15 Nov 2024

**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.



# Méthodes de prédiction de la qualité de surface en fraisage à grande avance : modélisation semi-analytique ou méthode dexels et impact de la dynamique

Thomas JACQUET<sup>(a)</sup>, Guillaume FROMENTIN<sup>(a)</sup>, Fabien VIPREY<sup>(a)</sup>,  
David PRAT<sup>(a)</sup>, Philippe LORONG<sup>(b)</sup>

*(a) Arts et Métiers Sciences et Technologies, LaBoMaP, Université Bourgogne Franche-Comté, 13 Rue Porte de Paris, F-71250 Cluny, France*

*(b) Arts et Métiers Sciences et Technologies, PIMM, CNRS, CNAM, 151 Boulevard de l'Hôpital, F-75013 Paris, France*

Mail : [thomas.jacquet@ensam.eu](mailto:thomas.jacquet@ensam.eu)

**Résumé :** Dans l'industrie moderne, l'usinage demeure un processus essentiel pour la réalisation de pièces mécaniques complexes. En particulier, l'industrie aérospatiale utilise largement des stratégies d'usinage à grande avance pour réaliser des géométries complexes à partir de bruts en superalliages à base de nickel. Lors d'une étude préalable, un modèle généralisé de fraisage à grande avance permettant la prédiction de la topographie de surface a été développé. Ce modèle semi-analytique intègre des paramètres géométriques cruciaux de l'outil et sa cinématique dans la machine, ainsi que les déformations en flexion de l'outil et de la machine engendrées par les efforts de coupe. Cependant, cette approche intègre uniquement la raideur statique du système usinant et non son comportement dynamique. Ainsi, dans cet article, le modèle précédemment développé est comparé à une méthode dexels grâce au logiciel métier Nussy2m permettant la prise en compte de la dynamique du système usinant.

**Mots clés :** Topographie de surface, Qualité de surface, Fraisage à grande avance, Modélisation, Dynamique, Dexels

## 1 Introduction

Pour la fabrication de pièces usinées, la qualité de surface peut jouer un rôle crucial. Dans ce contexte, la modélisation de la qualité de la surface est essentielle. Dans de nombreuses études, des modèles phénoménologiques sont développés sur la base d'une analyse expérimentale de la qualité de la surface, comprenant des lois empiriques (Alauddin, 1995) ou l'utilisation de réseaux de neurones et d'algorithmes génétiques (Imani, 2020). Cependant, ces techniques sont limitées à des conditions de coupe spécifiques et ne peuvent pas être généralisées. Des modèles plus généralisés sont développés grâce à des approches de modélisation analytique reposant sur la détermination numérique de la topographie de surface à l'aide de méthodes telles que le Z-buffer (Jerard, 1989 - Lavernhe, 2008) ou dexels (Van Hook, 1986 – Coffignal, 2015). Ces approches tiennent principalement compte de la géométrie nominale de l'outil par l'utilisation de maillages 3D. Dans certains domaines de l'usinage tels que la micro-fraisage pour le domaine médical où des qualités de surface spécifiques sont requises, des modèles géométriques analytiques des fraises sont développés, intégrant des paramètres géométriques spécifiques tels que le faux-rond de la fraise (Yuan, 2018). Le comportement mécanique de l'outil ou de la machine est également pris en compte dans diverses études, notamment la modélisation de sa rigidité en flexion (Araujo, 2018) ou de son comportement dynamique (Elbestawi, 1994). Néanmoins, de tels modèles nécessitent la modélisation préalable des efforts de coupe, qui repose principalement sur une approche mécaniste (Armarago, 1985 – Budak, 1996).

Lors d'une étude préalable, une méthode semi-analytique de modélisation généralisée de topographie de surface est établie dans un contexte de surfacage à grande avance, permettant la prise en compte d'une définition réaliste des arêtes de coupe de l'outil (ainsi que la prise en compte du faux rond) et de leur mouvement de coupe, perturbé par la flexion statique du système usinant sous l'effet des efforts de coupe (Jacquet, 2024).

Désormais, le modèle semi-analytique précédemment développé est comparé à une méthode dexels pour évaluer l'influence du comportement dynamique du système usinant sur la qualité de surface par rapport à l'influence de la raideur statique du système usinant.

## 2 Méthode semi-analytique de modélisation de la qualité de surface avec prise en compte de la flexion du système usinant

Selon une méthode semi-analytique développée précédemment (Jacquet, 2024), dans un premier temps, les arêtes de coupe d'une fraise à grande avance à embout torique à  $Z = 4$  dents et de diamètre 10 mm (*MMC IMX10C4FD10010C*) sont caractérisées puis modélisées analytiquement. Ce modèle des arêtes de coupe de l'outil intègre notamment le faux-rond. Puis, une opération de surfacage en avalant dans la direction d'avance  $-\vec{X}_m$  constituée de  $n_{passes}$  successives dans la direction  $\vec{Y}_m$  est définie dans le repère machine  $R_m = (O_m, \vec{X}_m, \vec{Y}_m, \vec{Z}_m)$ . Enfin, à partir d'une caractérisation expérimentale de la raideur d'une machine 3 axes *DMC 65V* d'architecture [bXYZt], la surface usinée est obtenue numériquement à partir de la modélisation des trajectoires des arêtes de coupe lors du surfacage, sous l'effet de la flexion du système usinant {outil, machine} due aux efforts de coupe (mesurés expérimentalement pour chaque essai défini dans le Tableau 1)

Tableau 1: Plan d'essais – Surfaçages d'une éprouvette en Inconel 718.

Numéro d'essai	Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	Avance par dent $f_z$ (mm/dent/tr)	Engagement radial $a_e$ (mm)	Profondeur de passe $a_p$ (mm)	Nombre de passes $n_{passes}$
1	25	0,2	2	0,155	3
2	25	0,2	5	0,155	2
3	25	0,3	2	0,155	3
4	25	0,3	5	0,155	2

A partir de l'éprouvette en Inconel 718 issue des essais de caractérisation des efforts de coupe, la topographie de surface des différents essais est mesurée à l'aide d'un microscope optique à variation focale *Alicona InfiniteFocusSL*, puis comparée au modèle avec et sans prise en compte de la flexion du système usinant. De cette manière, une première validation du modèle est effectuée. De plus, en comparant les simulations numériques avec et sans flexion, l'influence majeure de la raideur angulaire du système usinant sur la qualité de surface est mise en évidence (où la raideur angulaire caractérise la rotation du système usinant autour des axes  $(O_o, \overrightarrow{X_m})$  et  $(O_o, \overrightarrow{Y_m})$  sous l'effet des efforts de coupe, avec  $O_o$  un point appartenant à l'axe outil).

### 3 Simulation numérique de la surface usinée par méthode dexels & comparaison avec la méthode semi-analytique proposée

Dans l'état de son développement actuel, la méthode semi-analytique proposée ci-dessus pour modéliser la qualité de surface ne modélise pas la dynamique du système usinant sous l'effet des efforts de coupe.

Dans cette étude, dans le but d'évaluer les effets dynamiques du système usinant sur la qualité de surface, une approche dexels (Van Hook, 1986) est mise en œuvre pour évaluer la topographie et la qualité de surface dans des conditions similaires à la méthode semi-analytique précédemment évoquée. Cette approche est développée à l'aide de l'outil de simulation Nussy2m (Coffignal, 2015).

#### 3.1 Simulation numérique dexels en cinématique (outil et machine supposés infiniment rigides)

Tout d'abord, la simulation Nussy2m nécessite en entrées :

- Un maillage 3D des faces de coupe de l'outil,
- Un maillage de dexels de la pièce brute,
- Une discrétisation en portions linéaires de la trajectoire du centre de l'outil.

##### 3.1.1 Définition de la fraise à grande avance

A partir de la définition paramétrée des arêtes de coupe  $\overrightarrow{AC}_{i_z}$  de la fraise à grande avance (intégrant le faux-rond), un maillage 3D des faces de coupe est généré le long de chaque arête de coupe. Ces faces de coupe sont orientées par un de leurs vecteurs normaux  $\overrightarrow{nAC}_{i_z}$

construits à partir des angles de coupe et de direction d'arête, caractérisés expérimentalement par une mesure au microscope optique à variation focale *Alicona InfiniteFocusSL*.

Ce maillage des faces de coupe est constitué de  $n_T$  éléments triangulaires répartis le long de l'arête de coupe discrétisée en  $n_T$  portions de longueur curviligne identique (Figure 1). De manière à se placer dans des conditions numériques similaires à la méthode semi-analytique et donc à obtenir une erreur de corde maximale  $e_{c_{max}}$  similaire, l'arête de coupe est discrétisée en  $n_T = 50$  portions.

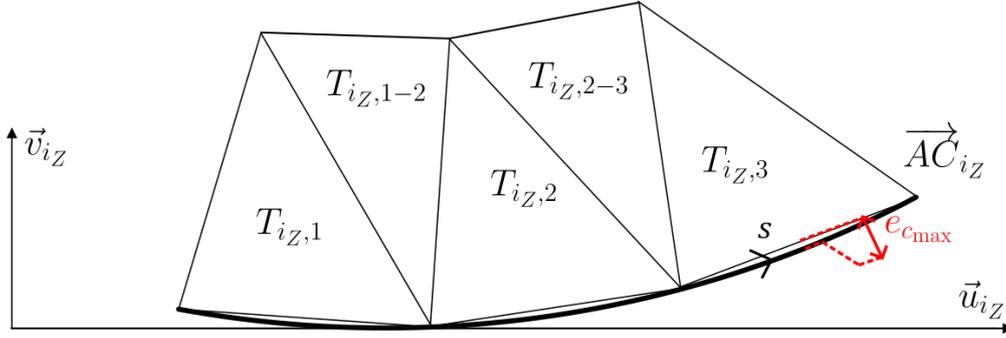


Figure 1 : Maillage de la face de coupe associée à l'arête de coupe  $i_z$  par  $n_T = 3$  éléments triangulaires le long de l'arête, dans le plan de coupe dirigé par les vecteurs  $\vec{u}_{i_z}$  et  $\vec{v}_{i_z}$ .

### 3.1.2 Définition de la pièce

La pièce brute est définie dans le repère pièce  $R_p = (O_p, \vec{x}_p, \vec{y}_p, \vec{z}_p)$  par un maillage de dexels dans le plan  $(O_p, \vec{x}_p, \vec{y}_p)$  où  $O_p$  est l'origine pièce. Un nombre  $n_{D_x}$  de dexels est défini dans la direction  $-\vec{x}_p$  ainsi qu'un nombre  $n_{D_y}$  de dexels dans la direction  $\vec{y}_p$ . L'altitude (suivant la direction  $\vec{z}_p$ ) des dexels ainsi définis représente l'altitude de la surface usinée, évoluant à chaque pas de temps de la simulation.

Ces dexels sont positionnés dans le plan  $(O_p, \vec{x}_p, \vec{y}_p)$  de telle sorte à ce qu'ils soient distants les uns des autres d'une distance  $d = 6 \mu\text{m}$  et aux mêmes positions vis-à-vis de la méthode semi-analytique, dans le but de comparer la surface usinée aux mêmes points du plan  $(O_p, \vec{x}_p, \vec{y}_p)$  entre les deux méthodes. Les nombres de dexels  $n_{D_x}$  et  $n_{D_y}$  sont choisis de manière à avoir une longueur de maillage d'au moins  $Zf_z$  dans la direction  $-\vec{x}_p$  et  $a_e$  dans la direction  $\vec{y}_p$ , similairement à la méthode semi-analytique ( $Zf_z$  et  $a_e$  étant les longueurs d'onde théoriques de la surface usinée dans les directions  $-\vec{x}_p$  et  $\vec{y}_p$ ).

### 3.1.3 Définition des trajectoires de l'outil

Enfin, pour chacune des simulations correspondant aux conditions de coupe des essais de surfacage (Tableau 2), la trajectoire du centre outil est définie pour chaque passe comme un déplacement dans la direction  $-\vec{x}_p$  à une vitesse d'avance  $\vec{V}_f = -Zf_z N \vec{x}$ , où  $N = 1168 \text{ tr/min}$  est la vitesse de rotation de la fraise. Cette trajectoire est décalée suivant  $\vec{y}_p$  d'une distance  $a_e$  pour chaque passe.

De plus, la position initiale du centre outil est définie de telle sorte à garantir le même défaut de synchronisation angulaire des dents entre chaque passe vis-à-vis des essais expérimentaux et de la méthode semi-analytique, pour permettre la comparaison.

### 3.2 Comparaison des deux méthodes en cinématique

A partir de la définition de la fraise, de la pièce et des trajectoires de l'outil, la simulation dexels est menée à l'aide de Nussy2m dans un contexte purement cinématique, c'est-à-dire sans prise en compte de la flexion de l'outil sous l'effet des efforts de coupe (la pièce usinée et le système usinant sont ici considérés infiniment rigides). La simulation est menée pour chacun des cas correspondant aux essais expérimentaux (Tableau 1). Les topographies de surfaces usinées ainsi obtenues sont comparées à celles issues de la méthode semi-analytique, ainsi que les critères de qualité de surface  $S_a$  (hauteur moyenne arithmétique),  $S_q$  (hauteur moyenne quadratique) et  $S_z$  (hauteur maximale) définis selon la norme NF EN ISO 25178-2:2022 et scalairement représentatifs de la topographie globale (hauteurs moyennes) et de l'amplitude totale (hauteur maximale) de la surface usinée.

Le Tableau 2 expose les critères de qualité de surface issus de la méthode semi-analytique ( $S_{s-an}$ ), ceux issus de la simulation dexels ( $S_{dex}$ ) ainsi que les écarts relatifs ( $E_{S_*}$ ) des critères issus de la simulation dexels par rapport à ceux obtenus par la méthode semi-analytique (la simulation dexels étant considérée comme une référence).

Tableau 2 : Critères de qualité de surface & écarts relatifs vis-à-vis de la méthode semi-analytique

Numéro d'essai	$S_{a_{s-an}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{a_{dex}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{S_a}$ (%)	$S_{q_{s-an}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{q_{dex}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{S_q}$ (%)	$S_{z_{s-an}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{z_{dex}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{S_z}$ (%)
1	0,745	0,750	0,58	1,055	1,056	0,13	6,09	6,03	1,04
2	10,89	10,87	0,15	15,61	15,55	0,33	69,52	69,21	0,44
3	1,149	1,152	0,24	1,462	1,459	0,22	7,40	7,35	0,65
4	10,831	10,829	0,02	15,58	15,55	0,18	70,40	70,26	0,20

Bien que les écarts relatifs pour les 3 critères restent inférieurs à 2 % entre les deux méthodes (et au maximum de l'ordre du dixième de micron en absolu), ils demeurent significatifs vis-à-vis de l'aspect purement numérique des deux méthodes. Ces écarts ne sont raisonnablement pas dus à l'erreur de corde  $e_c$  entre l'arête de coupe continue et sa discrétisation, de l'ordre de 50 nm.

Cependant, la simulation dexels a bénéficié d'un pas de temps bien plus faible par rapport au pas angulaire équivalent de la méthode semi-analytique pour une question de convergence de la surface usinée issue de la simulation dexels vers celle issue de la méthode semi-analytique. En effet, cette équivalence entre pas de temps et discrétisation angulaire demeure approximative (à cause de la différence fondamentale entre les deux méthodes de modélisation). Ainsi, cette meilleure résolution temporelle permet une observation plus fine de micro-motifs de la surface usinée, n'apparaissant pas à une

résolution temporelle plus grossière, ce qui peut causer ces écarts entre les critères de qualité de surface obtenus avec les deux méthodes.

### 3.3 Conclusion

Les écarts entre les deux méthodes restent négligeables vis-à-vis de la résolution de la commande numérique de la machine utilisée lors des essais expérimentaux de surfacage à grande avance.

Ainsi, il est vraisemblable de conclure que la méthode semi-analytique et la simulation dexels donnent une estimation de la topographie de surface comparable. Ceci contribue à la confiance que l'on peut avoir vis-à-vis des deux approches.

Dorénavant, il est possible d'introduire des phénomènes différents dans ces deux méthodes pour en évaluer l'influence sur la surface usinée.

## 4 Evaluation numérique de l'influence du comportement dynamique du système usinant sur la surface usinée

La méthode semi-analytique ne permettant pas de modéliser les phénomènes dynamiques du système usinant, ceux-ci sont introduits dans la simulation dexels, dans le but de comparer la surface usinée résultante au modèle statique permis par la méthode semi-analytique.

### 4.1 Caractérisation expérimentale du comportement dynamique en flexion du système usinant

Tout d'abord, le comportement dynamique en flexion du système usinant est caractérisé expérimentalement en sonnage. Selon cette méthode, un effort  $F$  est appliqué en bout d'outil à l'aide d'un marteau instrumenté, en face duquel l'accélération  $\ddot{u}$  du système usinant est mesurée sous la forme d'un signal analogique par un accéléromètre. Parallèlement, un capteur d'effort présent dans le marteau permet de remonter au signal d'effort appliqué en bout d'outil grâce à l'étalonnage préalable du marteau. Cette méthode est appliquée dans les directions  $\vec{X}_m$  et  $\vec{Y}_m$  de la machine. La fonction de transfert (en fonction de la pulsation  $\omega$ ) correspondant à l'équation (Eq. 2) est notée  $H_{\vec{I}}$ .

$$F_{\vec{I}}(\omega) = H_{\vec{I}}(\omega) \cdot u_{\vec{I}}(\omega), \vec{I} \in [\vec{X}_m, \vec{Y}_m] \quad (2)$$

A partir des signaux analogiques d'effort et d'accélération, les fonctions de transfert  $H_{\vec{X}_m}$  et  $H_{\vec{Y}_m}$  sont caractérisées expérimentalement d'après la norme ISO/TR 230-8:2010. De ces fonctions de transfert, uniquement le premier mode (correspondant ici au mode de flexion) est considéré pour la suite de l'étude.

Ce premier mode de flexion pour chacun des axes est modélisé comme un système à un degré de liberté (Eq. 3), de pulsation propre  $\omega_{0_{\vec{I}}}$ , de coefficient d'amortissement  $\xi_{\vec{I}}$  et de raideur  $k_{\vec{I}}$ .

$$\ddot{u}_{\vec{I}} + 2\xi_{\vec{I}}\omega_{0_{\vec{I}}}\dot{u}_{\vec{I}} + \omega_{0_{\vec{I}}}^2 u_{\vec{I}} = \frac{\omega_{0_{\vec{I}}}^2 F_{\vec{I}}}{k_{\vec{I}}} \quad (3)$$

Les paramètres  $\omega_{0\vec{l}}$  et  $\xi_{\vec{l}}$  sont identifiés par analyse modale à partir de la fonction de transfert  $H_{\vec{l}}$  expérimentale.

Cependant, la raideur axiale  $k_{\vec{l}}$  ayant peu d'influence sur la surface usinée par rapport à la raideur angulaire  $k_{\alpha\vec{l}}$  (Jacquet, 2024), le comportement dynamique considéré est celui caractérisant la rotation  $\alpha_{\vec{l}}$  de l'outil dans le plan  $(O_t, \vec{l}, \vec{Z}_m)$  (Eq. 4), en fonction de l'effort appliqué selon l'axe  $(O_t, \vec{l})$ , selon la théorie des poutres et l'hypothèse d'Euler-Bernoulli.

$$\ddot{\alpha}_{\vec{l}} + 2\xi_{\vec{l}}\omega_{0\vec{l}}\dot{\alpha}_{\vec{l}} + \omega_{0\vec{l}}^2\alpha_{\vec{l}} = \frac{\omega_{0\vec{l}}^2 F_{\vec{l}}}{\text{ArcTan } k_{\alpha\vec{l}}} \quad (4)$$

Les paramètres  $\omega_{0\vec{l}}$  et  $\xi_{\vec{l}}$  du système dynamique ainsi que la raideur angulaire  $k_{\alpha\vec{l}}$  identifiée précédemment sont répertoriés dans le Tableau 3. Ces paramètres étant peu différents entre les directions  $\vec{X}_m$  et  $\vec{Y}_m$ , il est possible de faire l'hypothèse que le comportement dynamique du système usinant est indépendant de l'axe, pour se ramener à un modèle axisymétrique. Cette indépendance est due à la relative axisymétrie de la fraise, *a priori* peu raide par rapport à la raideur propre de la broche de la machine DMC 65V.

Tableau 3 : Paramètres du système dynamique en flexion et raideurs angulaires identifiés expérimentalement.

Direction machine	Pulsation propre $\omega_{0\vec{l}}$ (rad/s)	Amortissement $\xi_{\vec{l}}$ (%)	Raideur angulaire $k_{\alpha\vec{l}}$ ( $10^5$ N)
$\vec{X}_m$	$1,7 \cdot 10^4$	2,4	2,8
$\vec{Y}_m$	$1,7 \cdot 10^4$	2,7	2,7

#### 4.2 Définition du modèle d'efforts de coupe

Sur l'outil Nussy2m, l'excitation dynamique du système usinant est uniquement causée par les efforts de coupe, dont le calcul est effectué à partir des efforts locaux de coupe selon une modélisation mécaniste (Armarego, 1985). La loi de coupe utilisée et implémentée dans le logiciel est de type affine (fonction de l'épaisseur coupée, calculée à chaque pas de temps de la simulation), dont les coefficients mécanistes correspondent à ceux identifiés par méthode inverse sur le même matériau, avec une fraise de même diamètre, de même nuance de carbure de tungstène et du même fabricant mais possédant deux tailles et un rayon de bec  $r_n = 1 \mu\text{m}$  (Ducroux, 2021).

#### 4.3 Simulation numérique dexels en flexion dynamique & comparaison avec la méthode semi-analytique en flexion statique

Le comportement dynamique du système, précédemment identifié, est implémenté sur Nussy2m par l'utilisation d'un maillage éléments finis de type poutre et d'une méthode d'intégration temporelle de type différences centrées. Ainsi, à chaque pas de temps, le

maillage de dexels de la pièce est actualisé en tenant compte de la flexion de l'outil sous l'effet des efforts de coupe simulés (la pièce est ici considérée infiniment rigide, contrairement au système usinant). La convergence de la solution est assurée par la méthode des différences centrées et par le choix d'un pas de temps suffisamment faible vis-à-vis de la période associée à la fréquence d'oscillation du système usinant (la condition CFL (Courant-Friedrich-Levy) est automatiquement vérifiée dans ce cas).

Cependant, pour être représentative de l'opération réelle de surfacage, la surface usinée simulée sur Nussy2m doit être issue d'un régime permanent (en efforts de coupe). Pour cela, le maillage de dexels est étendu de telle sorte à représenter l'engagement réel de l'outil en matière ainsi que pour permettre d'atteindre le régime permanent avant que l'outil ne commence à usiner la zone d'intérêt (de longueur  $Zf_z$  et de largeur  $a_e$ ).

En comparant la surface usinée issue de la modélisation semi-analytique statique et celle issue de la simulation dexels en dynamique, plusieurs analyses sont possibles. Tout d'abord, les critères de qualité de surface sont semblables entre les deux méthodes.

Cependant, une variation de topographie peut être observée (notamment sur la Figure 2 correspondant à l'essai n°3). Cette variation peut s'expliquer par l'implémentation d'une loi de coupe dans la simulation dexels par rapport à une prise en compte des efforts expérimentaux dans la méthode semi-analytique.

En effet, les écarts entre les efforts mesurés et simulés ont pour conséquence une différence comportementale en flexion du système usinant entre les deux méthodes, impactant différemment la topographie de la surface usinée. Néanmoins, cette différence de topographie entre les surfaces usinées issues des deux méthodes reste négligeable au regard de la différence entre ces surfaces simulées et les surfaces usinées puis mesurées expérimentalement. En effet, la répartition entre sommets et vallées, ainsi que les amplitudes associées, correspondent difficilement entre simulations et mesures réelles (p. ex. Figure 2).

Bien que la topographie générale des surfaces soient similaires, les amplitudes des vallées et des sommets des surfaces simulées sont élevées par rapport à la surface mesurée. Cette différence significative peut s'expliquer par une estimation incomplète du faux-rond. En effet, le faux-rond considéré dans cette étude est uniquement constitué de celui de l'insert à grande avance et de son montage dans le porte-outil. Cependant, le faux-rond induit par le montage en broche du porte-outil ou par l'usure de l'outil durant l'usinage ne sont pas mesurés. Or, l'usure des dents au cours des premiers instants de l'usinage (qui a tendance à diminuer le faux-rond) pourrait conduire à une diminution des amplitudes de la surface usinée. Néanmoins, bien que les topographies simulées et mesurées soient différentes, les critères de qualité de surface demeurent similaires (en absolu, bien que les écarts relatifs puissent varier d'un facteur 2, cf. Tableau 4).

Cependant, la faible longueur d'onde de la surface usinée (visible sur la Figure 2) ne semble pas due à la vibration du système usinant. En effet, l'implémentation du premier mode de flexion dans le modèle dexels n'influe pas significativement sur la surface usinée car la fréquence de passage des dents dans la matière ( $F_{dents} \simeq 80$  Hz) est faible devant la fréquence propre du mode ( $F_0 \simeq 2700$  Hz). Ainsi, cette longueur d'onde pourrait être davantage liée à des défauts micro-géométriques le long de l'arête de coupe au regard de la modélisation nominalement torique qui est faite de l'outil dans cette étude.

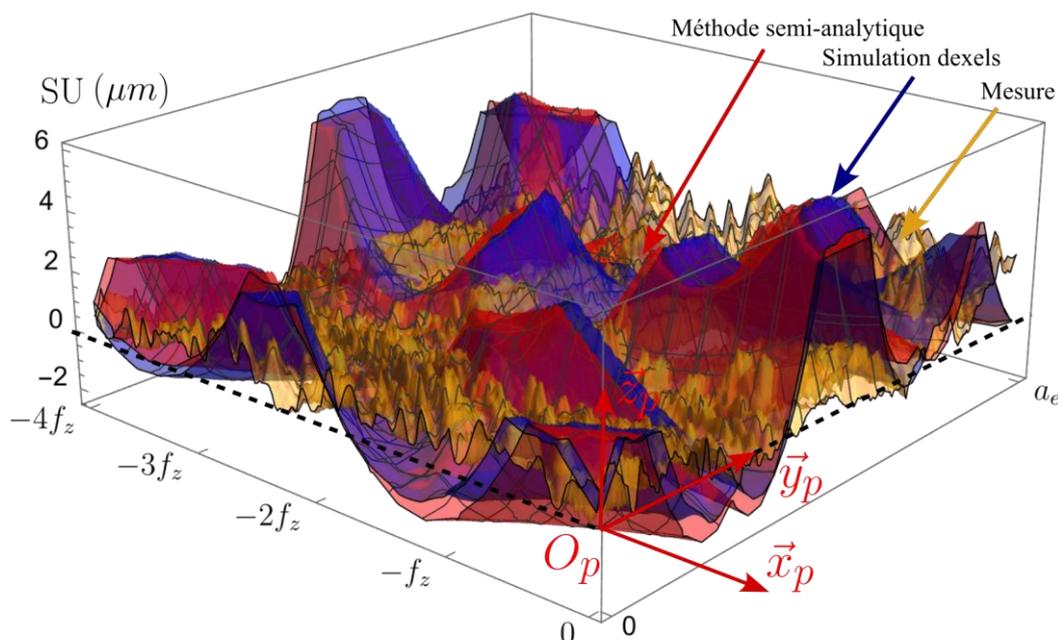


Figure 2 : Comparaison de la surface usinée (SU) issue de la mesure optique (en jaune) correspondant à l'essai n°3 avec la surface usinée modélisée à l'aide de la méthode semi-analytique (en rouge) et celle simulée à l'aide de la méthode dexels (en bleu) ( $f_z = 0,3 \text{ mm/dent/tr}$  ;  $a_e = 2 \text{ mm}$ )

Tableau 4 : Critères expérimentaux (mesurés) ( $S_{*mes}$ ) de qualité de surface & écarts relatifs vis-à-vis de la méthode semi-analytique ( $E_{S_{*s-an}}$ ) et de la simulation dexels ( $E_{S_{*dex}}$ )

Numéro d'essai	$S_{a_{mes}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{S_{a_{s-an}}}$ (%)	$E_{S_{q_{dex}}}$ (%)	$S_{q_{mes}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{S_{q_{s-an}}}$ (%)	$E_{S_{q_{dex}}}$ (%)	$S_{z_{mes}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$E_{S_{z_{s-an}}}$ (%)	$E_{S_{z_{dex}}}$ (%)
1	0,80	18,0	16,5	1,00	29,8	27,8	5,35	37,7	37,1
2	9,98	9,14	7,77	14,3	9,27	8,56	65,2	8,1	8,1
3	0,63	98,1	92,4	0,77	108	104,1	4,99	65,6	72
4	10,11	7,33	6,08	14,41	8,1	7,4	67,11	6,9	7,1

## 5 Conclusions et perspectives

Cette étude permet ainsi de valider numériquement une méthode semi-analytique de modélisation de surface usinée par la comparaison avec une méthode dexels, dans le cas où le système usinant et la pièce usinée sont considérés infiniment rigides. Puis, l'effet de la prise en compte du comportement statique en flexion du système usinant sur la surface usinée dans la méthode semi-analytique est comparé à celui de la prise en compte du premier mode vibratoire en flexion par le biais de la simulation dexels. Pour les conditions de coupe choisies, c'est-à-dire dans lesquelles la fréquence de passage des dents demeure faible par rapport à la fréquence du premier mode de flexion du système usinant, les deux méthodes aboutissent à une surface usinée similaire, mais peinent à représenter la topographie réelle de la surface usinée, bien que les critères de qualité de surface correspondent entre surfaces simulées et surfaces mesurées.

En perspective, il serait intéressant d'identifier les coefficients mécanistes de la loi de coupe utilisée dans le contexte précis de l'étude afin de permettre une comparaison plus précise entre les méthodes. De plus, le faux-rond caractérisé dans cette étude, en se limitant au faux-rond de l'outil avant l'usinage, ne permet pas d'évaluer l'influence du faux-rond réel du système usinant sur la surface usinée. L'évolution *in situ* de celui-ci sous l'effet de l'usure de l'outil pourrait donc constituer un point d'intérêt. Enfin, il serait pertinent de cartographier la raideur du système usinant sur l'ensemble de l'espace de travail afin d'évaluer l'impact de ses variations sur la surface usinée.

### Remerciements

Les auteurs du LaBoMaP remercient Philippe LORONG et Lounès ILLOUL de l'équipe DISCOH du PIMM pour l'aide apportée dans l'utilisation de leur outil de simulation dexels Nesy2m, ainsi que Serge BORECKI pour son assistance lors de la caractérisation dynamique du système usinant.

### Références

- M. Alauddin et al. (1995) *Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling*, *Journal of Materials Processing Technology*, vol 55, pp.123-127
- A.C. Araujo et al. (2018) *Investigation of tool deflection during milling of thread in cr-co dental implant*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 99, pp.531-541
- E.J.A. Armarego et al. (1985) *Computer based modelling of popular machining operations for force and power prediction*, *Cirp Annals*, vol 34.1, pp.65-69
- E. Budak et al. (1996) *Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data*
- G. Coffignal et al. (2015) *A general method to accurately simulate material removal in virtual machining of flexible workpiece*, *Research report*
- E. Ducroux et al. (2021) *New mechanistic cutting force model for milling additive manufactured Inconel 718 considering effects of tool wear evolution and actual tool geometry*, *Journal of Manufacturing Processes*, vol 64, pp.67-80
- M. Elbestawi et al. (1994) *Surface topography characterization in finish milling*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol 34, pp.245-255
- L. Imani et al. (2020) *Modeling and optimizing of cutting force and surface roughness in milling process of Inconel 738 using hybrid ANN and GA*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol 234, pp.920-932
- S. Lavernhe et al. (2008) *NC-simulation for the prediction of surface finish in 5-axis High-Speed Machining*, *3rd CIRP International Conference on High Performance Cutting*, pp.387-396
- T. Jacquet et al. (2024) *Modeling of high-feed milling and surface quality applied to Inconel 718*, *Procedia CIRP*, vol 000, pp.000-000
- R.B. Jerard et al. (1989) *Methods for detecting errors in numerically controlled machining of sculptured surfaces*, *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol 9, pp.26-39
- T. Van Hook (1986) *Real-time shaded NC milling display*, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol 20.4, pp.15-20
- Y. Yuan et al. (2018) *Surface roughness modeling in micro end-milling*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 95, pp.1655-1664
- Norme ISO/TR 230-8 (2010) *Code d'essai des machines-outils - Partie 8 : vibrations*, AFNOR
- Norme NF EN ISO 25178-2 (2022) *Spécification géométrique des produits (GPS) - État de surface : surfacique - Partie 2 : termes, définitions et paramètres d'états de surface*, AFNOR