



HAL
open science

Analyse des modèles de topographie de surface induits par une vibration outil-pièce mono-fréquence en tournage

Monica Gil-Inchaurza, Xavier Beudaert, Jokin Munoa, David Barrenetxea,
Jose Antonio Sanchez, Zoltan Dombovari

► To cite this version:

Monica Gil-Inchaurza, Xavier Beudaert, Jokin Munoa, David Barrenetxea, Jose Antonio Sanchez, et al.. Analyse des modèles de topographie de surface induits par une vibration outil-pièce mono-fréquence en tournage. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784354

HAL Id: hal-04784354

<https://hal.science/hal-04784354v1>

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.



Analyse des modèles de topographie de surface induits par une vibration outil-pièce mono-fréquence en tournage

Monica GIL-INCHAURZA^(a), Xavier BEUDAERT^(a), Jokin MUNOA^(a,b),
David BARRENETXEA^(a), Jose Antonio SANCHEZ^(b), Zoltan
DOMBOVARI^(c)

(a) IDEKO, Dynamique et contrôle, Elgoibar, Espagne

(b) Université du Pays Basque, Département de génie mécanique, Bilbao, Espagne

(c) Université de technologie et d'économie de Budapest, Département de mécanique appliquée, Budapest, Hongrie

Mail : xbeudaert@ideko.es

Résumé : Les ondulations indésirables induites par les vibrations de la machine-outil sont généralement associées à une mauvaise qualité de surface dans le domaine du tournage. La cinématique du processus et la dynamique de la machine-outil sont conjointement impliquées dans la génération de la topographie de la surface de la pièce. L'interférence de l'outil et les artefacts sub-Nyquist d'échantillonnage sont des facteurs décisifs dans le processus de formation de la topographie de surface et la génération de défauts d'ondulation. Cet article démontre qu'une seule fréquence de vibration peut générer trois modèles de topographie différents et fournit des relations analytiques pour la longueur d'onde et l'angle de l'hélice apparente par rapport à l'avance de l'outil. Le changement progressif de la topographie de la surface en fonction de l'amplitude et du rapport de fréquence des vibrations entre l'outil et la pièce à usiner est déterminé et validé avec succès.

Mots clés : Topographie de surface, vibration outil-pièce.

1 Introduction

Les exigences de qualité des pièces sont généralement définies en fonction des paramètres de rugosité et des tolérances géométriques. Cependant, une mauvaise qualité de surface peut être liée à des ondulations périodiques indésirables. Les ondulations de surface et les erreurs de forme peuvent être liées aux propriétés cinématiques et dynamiques de la machine-outil. (He, 2018) a présenté une analyse complète des facteurs qui influencent la topographie de surface en tournage et (Zhang, 2015) a présenté une revue des différentes vibrations de la machine-outil et de leur influence sur la topographie de surface.

Établir une relation directe entre les vibrations de la machine-outil et la topographie de la surface de la pièce n'est pas toujours évident. La présence de deux fréquences de vibration rapprochées peut générer des marques de battement (Merino, 2019). En outre, les vibrations à haute fréquence de la machine-outil peuvent générer des marques d'ondulation à basse fréquence (Grossi, 2018). (Takasu, 1985) a présenté pour la première fois l'influence de l'interférence de l'outil sur les mécanismes de formation du profil de la pièce. En cas d'interférence de l'outil, le profil de la pièce ne présente pas un motif régulier formé par des marques d'outil périodiques. Au lieu de cela, la marque de l'outil suivant élimine la plupart du temps la marque laissée par les révolutions précédentes de la pièce ou la survole (Dombovari, 2011). Pour étudier l'influence des vibrations sur la topographie de surface en dressage, (Zhou, 2009) a pris en compte à la fois l'interférence de l'outil et le théorème d'échantillonnage. Cependant, une compréhension plus approfondie du théorème d'échantillonnage et de la nature périodique du processus de tournage était nécessaire. En suivant cette idée, l'effet stroboscopique physique causé par la rotation de la pièce peut être considéré comme un échantillonnage de la vibration relative entre l'outil et la pièce. Cela peut entraîner des interférences quasi-périodiques entre l'échantillonnage stroboscopique et les fréquences physiques liées aux artefacts sub-Nyquist (Amidor, 2015). (Gil-Inchaurza, 2023) a démontré qu'une seule vibration outil-pièce peut générer plusieurs caractéristiques d'ondulation sur le profil d'une pièce tournée. Les interférences de l'outil et les artefacts sub-Nyquist de l'échantillonnage ont été pris en compte dans l'analyse des mécanismes de formation du profil de la pièce. (Grossi, 2018) a étudié l'influence des vibrations sur les mécanismes de formation des ondulations de surface en fraisage. Les travaux se sont concentrés sur l'analyse des propriétés spectrales du profil de la pièce. Cependant, peu de travaux de recherche sont axés sur l'influence des vibrations de l'outil sur le modèle de topographie de surface.

Nomenclature

a	Partie entière du rapport de fréquence
a_{pr}	Profondeur de coupe radiale (mm au rayon)
A	Amplitude de la vibration relative outil-pièce (μm)
A_k	Amplitude des enveloppes des ondes sub-Nyquist (μm)
D	Diamètre de la pièce (mm)
f	Fréquence de la vibration relative outil-pièce (Hz)
f_r	Rapport de fréquence entre la fréquence de vibration relative outil-pièce et la vitesse de rotation de la broche

f_s	Fréquence spatiale de passage de l'outil (mm^{-1})
f_z	Avance par tour (mm/tour)
f_ε	Fréquence spatiale de la vibration relative outil-pièce évaluée aux points de passage outil-pièce (mm^{-1})
f'_ε	Fréquence spatiale des ondes sub-Nyquist (mm^{-1})
k	Indice de l'onde sub-Nyquist de vibration outil-pièce
l_k	Longueur des ondes sub-Nyquist (mm)
l_r	Longueur de la vibration relative outil-pièce évaluée aux points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ (mm)
N	Vitesse de rotation de la pièce (tr/min)
N_h	Nombre d'hélices
N_k	Dénominateur de la différence de sous-échantillonnage rationnel et nombre d'ondes sub-Nyquist entrelacées
N_m	Numérateur de la différence de sous-échantillonnage rationnel
r	Indice de révolution de la pièce
r_ε	Rayon de bec de l'outil (mm)
R_t	Hauteur totale du profil (μm)
x	Variation de l'amplitude de la vibration relative outil-pièce (μm)
x_k	Variation de l'amplitude des ondes sub-Nyquist (μm)
x_r	Variation de l'amplitude de la vibration relative outil-pièce évaluée aux points de passage outil-pièce (μm)
z	Position de l'outil dans la direction d'avance (mm)
z_k	Points d'intersection outil-pièce appartenant à l'onde sub-Nyquist k (mm)
z_r	Points d'intersection outil-pièce (mm)
α_h	Angle d'hélice (rad)
β_k	Phase des ondes sub-Nyquist (rad)
β_r	Phase de la vibration relative outil-pièce évaluée aux points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ (rad)
ε	Partie décimale du rapport de fréquence
θ_h	Distance angulaire entre les hélices (rad)
θ_p	Section angulaire de la pièce (rad)
λ_h	Longueur d'onde de l'hélice (mm)
λ_ε	Longueur d'onde de la vibration relative outil-pièce évaluée aux points de passage outil-pièce (mm)
λ'_ε	Longueur d'onde des ondes sub-Nyquist (mm)
$\lambda_{m-k \varepsilon}$	Phase spatiale entre les ondes sub-Nyquist (mm)
φ	Phase initiale de la vibration relative outil-pièce (rad)

L'intégration de l'effet des vibrations de la machine-outil dans l'analyse théorique des mécanismes de génération de la topographie de surface est une tâche complexe. Une méthode indirecte basée sur des modèles de simulation est largement utilisée pour analyser l'influence des vibrations machine-outil sur la topographie de surface de la pièce. (Zequin, 2018) ont présenté un modèle de simulation de la topographie de surface en dressage où l'influence des vibrations de l'outil et de la pièce dans la direction de pénétration, de coupe et d'avance a été analysée. (Zhang, 2017) ont étudié l'influence des vibrations axiales de la broche sur le modèle de topographie de surface en dressage. Le motif régulier de la topographie de surface était corrélé au rapport entre la fréquence de vibration et la vitesse de la broche. Toutefois, la validation du travail était limitée à un rapport entier entre la fréquence de vibration et la vitesse de la broche. (Kim, 2002) ont étudié les motifs de topographie de surface induits par les effets de vibration de l'outil en dressage. Le motif de surface en spirale a été caractérisé théoriquement et expérimentalement et corrélé avec le rapport entre la fréquence de vibration et la vitesse de la broche. Cependant, seul le motif de surface laissé par la vibration outil-pièce a été pris en compte, et la géométrie de l'outil a été ignorée. Bien que les vibrations de la machine-outil aient été largement étudiées, des lacunes importantes subsistent dans la recherche sur l'influence des vibrations de la machine-outil sur l'ondulation de la surface. En effet, l'interaction cinématique sous-jacente entre les vibrations de la machine-outil et le processus de coupe est mal comprise.

L'objectif de cet article est d'étudier l'influence d'une fréquence de vibration unique sur les modèles de topographie de surface en tournage. Les calculs démontrent qu'une seule fréquence relative de vibration outil-pièce peut générer une variété de modèles de topographie de surface. La section 2 analyse la vibration outil-pièce et sa modulation ondulatoire oscillante. Dans la section 3, les modèles de topographie de surface sont caractérisés et corrélés avec le rapport de fréquence et l'amplitude des vibrations de l'outil et de la pièce.

2 Vibrations relatives entre l'outil et la pièce

Un aperçu du processus de tournage est présenté sur la Figure 1a. Le modèle de tournage suppose une géométrie d'outil avec un rayon de bec r_ϵ et une vibration harmonique entre l'outil et la pièce dans la direction de pénétration. Le mouvement linéaire de l'outil dans le sens de l'avance et la rotation simultanée de la pièce se traduisent par une trajectoire en spirale de l'outil le long de la surface de la pièce (Figure 1a-b).

La topographie de la pièce est construite à partir de profils à différentes sections angulaires de la pièce θ_p . L'erreur de topographie de surface est définie comme la différence entre le rayon réel et le rayon nominal de la pièce. Un mouvement relatif de vibration outil-pièce dans le sens de pénétration modifie la profondeur de coupe réelle a_{pr} (Figure 1c). Le mouvement de vibration outil-pièce le long de la trajectoire $x(z)$ de l'outil est donné par les équations Eq.1 et Eq. 2 (Gil-Inchaurza, 2023).

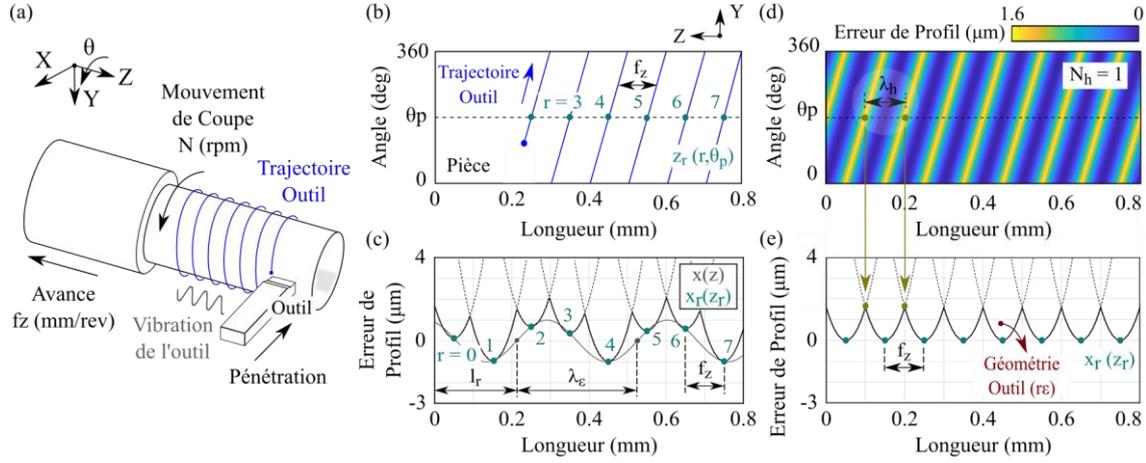


Figure 1 : (a) Aperçu du processus de tournage ; (b) Vue à plat de la trajectoire de l'outil et des points de passage outil-pièce ; (c) Profil de la pièce avec une vibration outil-pièce de rapport de fréquence $f_r = 0,32$ et d'amplitude $A = 1\mu\text{m}$; (d) Topographie de la surface de la pièce sans aucune vibration ; (e) Profil de la pièce sans aucune vibration.

$$x(z) = A \sin\left(-2\pi f_r \frac{z}{f_z} + \varphi\right), \quad (1)$$

$$f_r = \frac{60 \cdot f}{N} = a + \varepsilon \quad (2)$$

Le rapport de fréquence f_r est le rapport entre la fréquence de vibration outil-pièce f et la vitesse de broche de la pièce N . Le rapport de fréquence f_r est divisé en une partie entière positive a et une partie décimale ε , qui est exprimée dans la plage $-0.5 < \varepsilon \leq 0.5$.

La partie entière du rapport de fréquence a représente le nombre de périodes de vibration outil-pièce $1/f$ accomplies au cours d'une période de révolution de la pièce $60/N$. Par conséquent, la partie décimale du rapport de fréquence ε représente le reste de la période entière la plus proche.

L'outil traverse chaque section angulaire à chaque avance par tour f_z , réalisant essentiellement une cartographie stroboscopique du mouvement relatif de vibration outil-pièce (Figure 1b-c). A chaque point de passage $x_r(z_r)$, entre l'outil et la pièce, le bec de l'outil laisse une marque sur la surface de la pièce (Figure 1c). Ainsi, la topographie de la surface est formée par l'intersection périodique entre les marques successives du bec de l'outil à chaque point de passage de l'outil sur la pièce. Les points de passage outil-pièce (Figure 1b-c) sont donnés par l'Eq.3.

$$z_r := -\left(\frac{\theta_p}{2\pi} + r\right) f_z, \quad r = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

L'indice r désigne chaque révolution de la pièce et θ_p la section angulaire spécifique de la pièce.

La vibration outil-pièce évaluée aux points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ est donnée dans les équations Eq 4 à Eq 6 comme expliqué dans (Gil-Inchaurza, 2023).

$$x_r(z) = A \sin\left(-2\pi \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} \frac{z}{\lambda_\varepsilon} + \beta_r\right), \quad (4)$$

$$\lambda_\varepsilon = \frac{f_z}{|\varepsilon|}, \quad (5)$$

$$\beta_r := a \theta_p + \varphi \quad (6)$$

La phase spatiale $x_r(z_r)$ de la vibration outil-pièce est calculée à partir de l'Eq.4 comme $l_r = (2\pi - \beta_r) \lambda_\varepsilon / 2\pi$ (Figure 1c). La vibration outil - pièce à différentes sections angulaires θ_p a la même amplitude A et la même longueur d'onde λ_ε mais une phase différente β_r (Eq.4 - Eq.6). En effet, la phase de la vibration outil-pièce β_r à chaque section angulaire spécifique θ_p ne dépend que de la partie entière du rapport de fréquence a , tandis que la longueur d'onde de la vibration outil-pièce λ_ε dépend à la fois de l'avance par tour f_z et de la valeur absolue de la partie décimale du rapport de fréquence.

Le processus de tournage a un effet d'échantillonnage stroboscopique sur la vibration outil-pièce. En raison de la nature périodique du processus, la vibration outil-pièce le long de la direction d'avance $x(z)$ est évaluée à la fréquence spatiale de passage de l'outil $f_s = 1 / f_z$ (Figure 1c). Comme défini dans l'Eq.5, la relation entre la fréquence spatiale de vibration outil-pièce $f_\varepsilon = 1 / \lambda_\varepsilon$ et la fréquence spatiale de passage de l'outil f_s est donnée par la valeur absolue de la partie décimale du rapport de fréquence $|\varepsilon|$.

Étant donné une fonction périodique avec une fréquence $f_\varepsilon = 1 / \lambda_\varepsilon$ et une fréquence d'échantillonnage $f_s = 1 / f_z$, des artefacts sub-Nyquist, ou effets de pseudo-moiré, apparaissent (Amidor, 2015) si une différence de sous-échantillonnage rationnelle (N_m/N_k) est appliquée sur f_ε .

$$f'_\varepsilon = \left| f_\varepsilon - \frac{N_m}{N_k} f_s \right| \quad (7)$$

La vibration outil-pièce $x_r(z_r)$ présente une forme ondulée modulée par des enveloppes de basse fréquence (Figure 2a). La vibration outil-pièce $x_r(z_r)$ peut être divisée en N_k ondes basse fréquence entrelacées $x_k(z_k)$, où $f'_\varepsilon = 1 / \lambda'_\varepsilon$ est la fréquence des N_k ondes entrelacées. Les points de passage outil-pièce tombent par intermittence sur chaque onde $x_k(z_k)$ et la phase spatiale entre chaque onde est $\lambda_{m-k\varepsilon} = \lambda'_\varepsilon / N_k$.

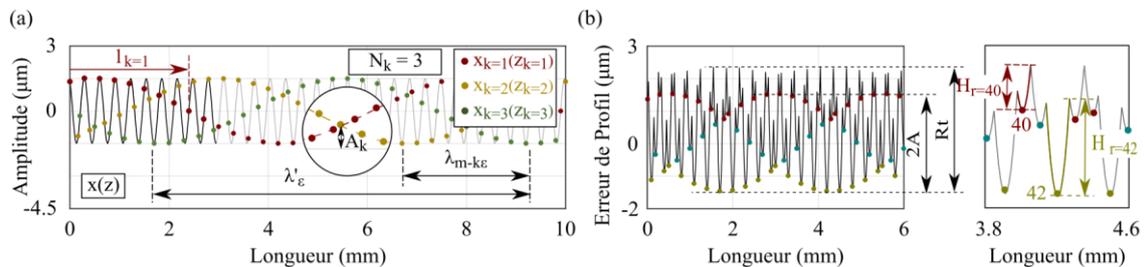


Figure 2 : (a) Vibration outil-pièce $x(z)$ et des points de passage outil - pièce $x_r(z_r)$ avec un rapport de fréquence $f_r = 2,32$ et une amplitude $A = 1,5\mu\text{m}$ et (b) profil de la direction d'avance de la pièce à la section angulaire $\theta_p = 0^\circ$ pour une avance par tour $f_z = 0,1\text{mm/rev}$, un rayon de bec de l'outil $r_\varepsilon = 0,8\text{mm}$.

La Figure 2a présente la vibration outil-pièce $x(z)$ et la vibration outil-pièce évaluée aux points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ avec un rapport de fréquence $f_r = 0,32$ et $A = 1\mu\text{m}$ d'amplitude et une avance par tour de $f_z = 0,1\text{mm/rev}$. L'artefact sub-Nyquist du troisième ordre est visible et la vibration outil-pièce $x_r(z_r)$ semble être décomposée en $N_k = 3$ ondes entrelacées.

En dérivant de l'Eq.7, la longueur d'onde de chaque onde sub-Nyquist est donnée par l'Eq.8, tandis que la phase spatiale entre les ondes est calculée par l'Eq.9.

$$\lambda'_\varepsilon = \left| \frac{f_z}{|\varepsilon| - \frac{N_m}{N_k}} \right|, \quad (8)$$

$$\lambda_{m-k\varepsilon} = \left| \frac{f_z}{N_k |\varepsilon| - N_m} \right| \quad (9)$$

Le point de passage outil-pièce z_k qui tombe par intermittence sur chaque onde est donné par l'Eq.10.

$$z_k := - \left(\frac{\theta_p}{2\pi} + i N_k + (k-1) \right) f_z, \quad (10)$$

où $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ et $k = 1, 2, \dots, N_k$.

Chaque onde entrelacée N_k a une longueur d'onde de λ'_ε et la même amplitude que la vibration outil-pièce A , voir Figure 2a. La phase spatiale l_k de chaque onde entrelacée N_k peut être obtenue en faisant correspondre la vibration outil-pièce $x(z)$ et l'onde k $x_k(z)$, toutes deux évaluées aux points de passage outil-pièce qui tombent sur l'onde k (z_k) : $x(z_k) = x_k(z_k)$. Enfin, chaque onde k peut être exprimée comme dans les équations Eq.11 à Eq.13.

$$x_k(z) = A \sin \left(2\pi \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} \frac{z}{\lambda'_\varepsilon} + \beta_k \right), \quad |\varepsilon| \leq \frac{N_m}{N_k} \quad (11)$$

$$x_k(z) = A \sin \left(-2\pi \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} \frac{z}{\lambda'_\varepsilon} + \beta_k \right), \quad |\varepsilon| > \frac{N_m}{N_k} \quad (12)$$

$$\beta_k(\theta_p) = \left(a + \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} \frac{N_m}{N_k} \right) \theta_p + \varphi + 2\pi \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} \frac{N_m}{N_k} (k-1) \quad (13)$$

Et, d'après les équations Eq.11 et Eq.12, la phase spatiale l_k de l'onde k sub-Nyquist $x_k(z)$ est : $l_k = (2\pi - \beta_k) \lambda'_\varepsilon / 2\pi$. L'amplitude des enveloppes inférieure et supérieure (Figure 2a) est calculée par l'équation Eq.14.

$$A_k = A \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{N_k} \right) \right) \quad (14)$$

L'amplitude des enveloppes vibratoires outil-pièce A_k ne dépend que du nombre d'ondes N_k . En effet, plus le nombre d'ondes N_k est élevé, plus l'amplitude des enveloppes A_k est faible.

La génération de la topographie de surface est un processus périodique au cours duquel l'outil façonne la surface de la pièce à la fréquence de passage de l'outil. Cette section a analysé le comportement stroboscopique de la vibration outil-pièce évaluée à la fréquence de passage de l'outil, qui peut créer des artefacts sub-Nyquist. Comme le démontrera la section suivante, l'échantillonnage et l'apparition d'artefacts sub-Nyquist sont des facteurs clés qui influencent la formation de la topographie de surface.

3 Effet de la vibration outil-pièce sur la topographie de la surface de la pièce

L'objectif est de caractériser les modèles de topographie de surface en fonction de la vibration relative de l'outil et de la pièce à usiner. Le motif de l'hélice est défini par la géométrie de l'outil et la modulation ondulatoire périodique de la vibration outil-pièce. L'apparition d'interférences avec l'outil et la présence d'artefacts sub-Nyquist sont des facteurs clés dans la formation des motifs de topographie de surface.

La Figure 1d-e présente l'erreur de topographie de surface calculée et l'erreur de profil dans la direction de l'avance sans aucune vibration entre l'outil et la pièce. En l'absence de vibration outil-pièce, l'erreur de profil aux points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ est égale à 0 et la topographie de la surface de la pièce est définie par les pics maximaux du profil. En outre, la topographie de la surface met en évidence la trajectoire en hélice de l'outil. La topographie de surface présente $N_h = 1$ hélice par révolution de la pièce et une longueur d'onde d'hélice égale à l'avance par tour $\lambda_h = f_z$.

3.1 Effet de l'amplitude des vibrations entre l'outil et la pièce

Lorsque l'amplitude de vibration outil-pièce augmente, l'angle et la longueur d'onde des hélices observées sur la topographie de surface changent progressivement. Sur la base du mécanisme de génération de la topographie de surface, trois modèles différents de topographie de surface sont identifiés pour le cas de fréquence de vibration unique étudié ici.

3.1.1 Modèle de topographie de surface I : coupe continue

La Figure 3.1a-c présente l'erreur de topographie de la surface de la pièce calculée et l'erreur de profil de la direction de l'avance pour un rapport de fréquence $f_r = 2,32$ et une faible amplitude de vibration outil-pièce $A = 0,3\mu\text{m}$. Lorsque les amplitudes de vibration outil-pièce sont faibles, la hauteur totale du profil R_t est beaucoup plus élevée que l'amplitude crête à crête outil-pièce $2A$, comme le montre la Figure 3.1c. Tous les points de passage successifs entre l'outil et la pièce laissent une marque d'outil et la distance entre les points de passage successifs entre l'outil et la pièce est égale à l'avance par tour f_z , comme le montre la Figure 3.1b. L'hélice de la topographie de surface est définie par les pics maximaux du profil, qui sont séparés par une distance approximativement égale à l'avance par tour $\lambda_h = f_z$ (Figure 3.1a-b). La topographie de la surface présente un motif d'hélice $N_h = 1$ qui correspond à l'avance programmée de l'outil. En outre, un motif d'hélice sous-jacent, lié à la vibration outil-pièce (λ_ε), est observé dans le sens inverse.

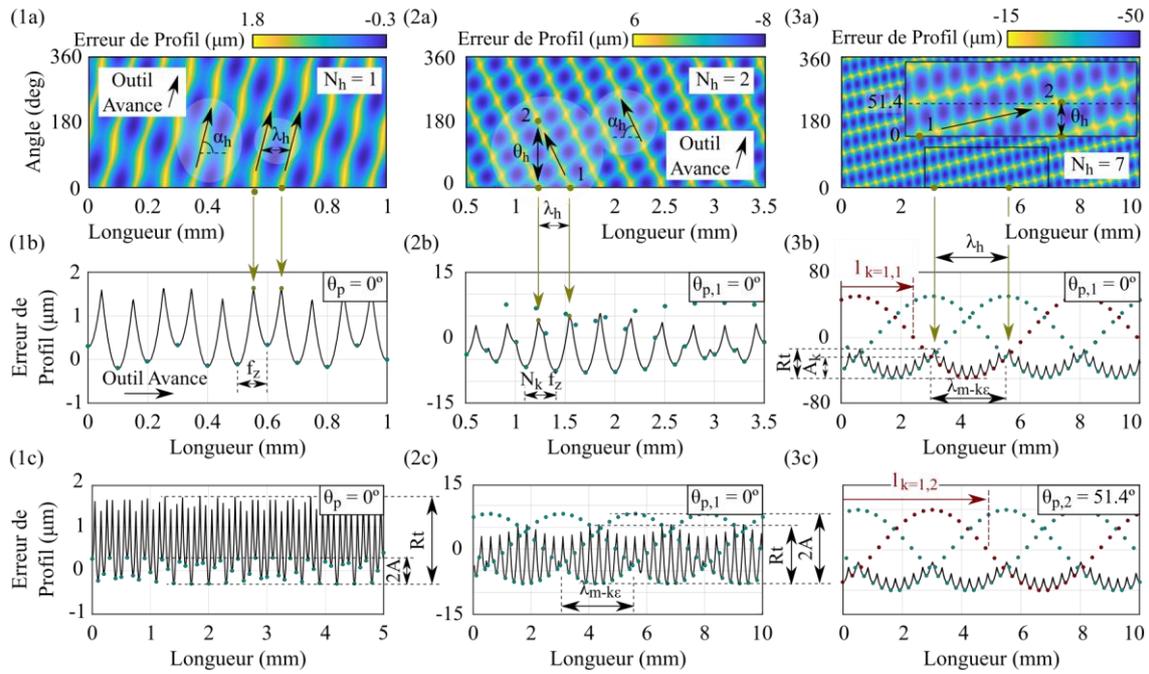


Figure 3 : Calcul (a) de la topographie de la surface de la pièce et (b-c) du profil de la direction de l'avance pour une avance par tour $f_z = 0,1$ mm/tour, un rayon de bec de l'outil $r_\varepsilon = 0,8$ mm et un rapport de fréquence de vibration outil-pièce relatif $f_r = 2,32$ et une amplitude (1) $A = 0,3$ μm ; (2) $A = 8$ μm et (3) $A = 50$ μm .

3.1.2 Modèle de topographie de surface II : vibration outil-pièce

Lorsque l'amplitude de la vibration outil-pièce augmente, la hauteur totale du profil R_t se rapproche de l'amplitude crête à crête de la vibration outil-pièce $2A$ (Figure 2b). Lorsque le profil de la pièce se rapproche des conditions d'interférence de l'outil, les points de passage $x_r(z_r)$ entre l'outil et la pièce, qui se situent dans l'enveloppe supérieure de la vibration, commencent à présenter des marques d'outil incomplètes. Par conséquent, la hauteur de profil des marques d'outil de l'enveloppe inférieure ($H_{r=42}$ pour $z_{r=42} = 4,2$ mm dans la Figure 2b) est beaucoup plus élevée que la hauteur de profil des marques d'outil de l'enveloppe supérieure ($H_{r=40}$ pour $z_{r=40} = 4$ mm dans la Figure 2b). Les marques d'outil de l'enveloppe inférieure sont prédominantes et le profil général est défini par les marques d'outil de l'enveloppe inférieure.

La Figure 3.2a-c présente l'erreur de topographie de la surface de la pièce calculée et l'erreur de profil de la direction de l'avance pour un rapport de fréquence de vibration outil-pièce de $f_r = 2,32$ et une amplitude de $A = 8\mu\text{m}$. En cas d'interférence de l'outil, les points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ qui tombent sur l'enveloppe supérieure de la vibration ne laissent pas de marque d'outil (Figure 3.2c).

Ainsi, le profil de la pièce est formé par les marques d'outil situées aux points de passage de l'enveloppe inférieure entre l'outil et la pièce (Figure 3.2c) et l'hélice de la topographie de surface met en évidence les pics maximums du profil (Figure 3.2a-b). La distance entre les points de passage successifs de l'enveloppe inférieure de l'outil et de la pièce est de $N_k f_z$ et la distance entre les pics du profil maximal est d'environ $\lambda_h = \lambda_\varepsilon$. Lorsque les vibrations entre l'outil et la pièce augmentent, elles ont une influence majeure sur la

topographie de la surface (Figure 3.2a). Le motif principal de l'hélice n'est plus défini par la coupe continue mais par la vibration outil-pièce λ_ε .

Lorsque la pièce tourne, les pics maximaux du profil avancent dans l'hélice (Figure 3.2a). L'emplacement des pics maximaux du profil dépend de l'emplacement spatial des points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ à chaque section angulaire θ_p , qui est défini par la phase spatiale de vibration outil-pièce l_r . Ainsi, la progression de l'hélice le long de la direction d'avance est déterminée par la phase spatiale de vibration outil-pièce: $l_r = (2\pi - \beta_r) \lambda_\varepsilon / 2\pi$, voir Eq.4 et Figure 1c. La distance angulaire entre les hélices θ_h est déterminée par l'angle de la pièce entre deux sections angulaires $\theta_h = \theta_{p,2} - \theta_{p,1}$ entre lesquelles l'hélice avance, dans le sens de l'avance, d'une distance égale à la longueur d'onde de l'hélice (Figure 3.2a): $(l_{r,2} - l_{r,1}) = \lambda_h$. En développant cette dernière condition, la distance angulaire entre les hélices est donnée par l'Eq.15.

$$\theta_h = -2\pi \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} \frac{1}{a} \quad (15)$$

Le nombre d'hélices par révolution de la pièce est calculé à partir de la distance angulaire entre les hélices, $N_h = 2\pi/|\theta_h|$, et est donné par l'Eq.16. L'angle d'hélice est calculé à partir de $\alpha_h = \text{atan}((D \theta_h / 2) / \lambda_h)$.

$$N_h = a \quad (16)$$

Le nombre d'hélices est égal à la partie entière du rapport de fréquence a et le signe de la partie décimale du rapport de fréquence ε détermine le sens de l'hélice. Alors qu'un sens d'hélice positif représente un motif d'hélice dans le même sens que l'avance de l'outil, un sens d'hélice négatif représente un motif d'hélice dans le sens opposé à l'avance de l'outil. La topographie de surface présentée à la Figure 3.2a montre $N_h = 2$ hélices par tour de pièce dans le sens opposé à l'avance de l'outil. Un motif d'hélice sous-jacent lié à la modulation ondulatoire à basse fréquence ($\lambda_{m-k \varepsilon}$) de la vibration outil-pièce est également détecté.

3.1.3 Modèle de topographie de surface III: vibration outil-pièce et modulation basse fréquence

Lorsque l'amplitude de la vibration outil-pièce augmente jusqu'à une valeur où la hauteur totale du profil R_t s'approche de l'amplitude A_k des enveloppes de vibration outil-pièce (Figure 3.3b-c), la topographie de la surface est formée par l'enveloppe inférieure à basse fréquence de la vibration. L'interférence de l'outil se produit et seuls les points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ qui tombent sur l'enveloppe inférieure de la vibration outil-pièce laissent une marque d'outil.

La Figure 3.3a-c présente l'erreur calculée de topographie de la surface de la pièce et l'erreur de profil de la direction de l'avance pour un rapport de fréquence de vibration outil-pièce de $f_r = 2,32$ et une amplitude de $A = 50 \mu\text{m}$. L'hélice illustre les pics maximums de l'enveloppe inférieure de la vibration, dont la distance est égale à la phase spatiale entre chaque onde k : $\lambda_h = \lambda_{m-k \varepsilon}$.

Lorsque la pièce tourne, les pics maximaux de l'enveloppe inférieure de la vibration outil-pièce progressent dans l'hélice (Figure 3.3a). L'emplacement des pics maximaux de l'enveloppe inférieure à chaque section angulaire θ_p est déterminé par la phase spatiale des ondes sub-Nyquist de la vibration de l'outil et de la pièce: $l_k = (2\pi - \beta_k) \lambda'_\varepsilon / 2\pi$, voir Figure 3.3b-c. Ainsi, la distance angulaire entre les hélices θ_h est définie par l'angle de la pièce entre deux sections angulaires $\theta_h = \theta_{p,2} - \theta_{p,1}$ entre lesquelles l'hélice avance, dans le sens de l'avance, d'une distance égale à la longueur d'onde de l'hélice (Figure 3.3a) : $(l_{k,2} - l_{k,1}) = \lambda_h$. La distance angulaire entre les hélices est donnée par les équations Eq.17 et Eq.18.

$$\theta_h = \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} \frac{2\pi}{\left(N_k a + \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} N_m\right)}, \quad |\varepsilon| \leq \frac{N_m}{N_k}, \quad (17)$$

$$\theta_h = -\frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} \frac{2\pi}{\left(N_k a + \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} N_m\right)}, \quad |\varepsilon| > \frac{N_m}{N_k} \quad (18)$$

Le nombre d'hélices, $N_h = 2\pi/|\theta_h|$ est calculé par l'Eq.19. Et l'angle d'hélice est calculé à partir de $\alpha_h = \text{atan}((D \theta_h / 2) / \lambda_h)$.

$$N_h = \left(N_k a + \frac{\varepsilon}{|\varepsilon|} N_m\right) \quad (19)$$

L'équation Eq.19 révèle que le nombre d'hélices dépend de la différence de sous-échantillonnage rationnel N_m/N_k , de la partie entière du rapport de fréquence a et du signe de la partie décimale du rapport de fréquence ε . La topographie de surface présentée à la Figure 3.3a-c présente une différence de sous-échantillonnage rationnel de $N_m/N_k = 1/3$, $N_k = 3$ ondes sub-Nyquist et le nombre d'hélices observées sur la topographie de surface est $N_h = N_k a + N_m = 7$.

L'influence de l'amplitude relative des vibrations entre l'outil et la pièce à usiner sur le motif d'hélice de la topographie de surface a été démontrée dans la Figure 3. En effet, la même défaillance machine-outil peut générer différents motifs d'hélice de topographie de surface. La Figure 3 et le Tableau 1 résument les trois mécanismes différents de génération de topographie de surface. Lorsque le niveau de vibration est faible, la vibration outil-pièce a peu d'influence sur la topographie de surface principale, qui est définie par la coupe continue. Lorsque l'amplitude de la vibration outil-pièce augmente, la vibration commence à être visible sur la topographie de la surface. Enfin, pour les amplitudes élevées de vibration outil-pièce, la modulation ondulatoire à basse fréquence de la vibration outil-pièce définit le motif de la topographie de surface. Dans la topographie de surface II, le nombre d'hélices N_h dépend directement de la partie entière du rapport de fréquence a , Eq.16. Dans le modèle de topographie de surface III, le nombre d'hélices N_h dépend non seulement de la partie entière du rapport de fréquence a , mais aussi de la partie décimale du rapport de fréquence ε , Eq.19.

Tableau 1 : Caractérisation des motifs de la topographie de surface.

Condition	Longueur d'onde de l'hélice: λ_h	Nombre d'hélices: N_h	Sens de l'hélice par rapport à l'avance de l'outil : $sign(\theta_h)$	
I $R_t \gg 2A$	f_z	1	1	
II $R_t \sim 2A$	λ_ε	a	$-\varepsilon/ \varepsilon $	
III $R_t \ll 2A$	$\lambda_{m-k\varepsilon}$	$\left(N_k a + \frac{\varepsilon}{ \varepsilon } N_m\right)$	$\varepsilon/ \varepsilon $	$ \varepsilon \leq N_m/N_k$
			$-\varepsilon/ \varepsilon $	$ \varepsilon > N_m/N_k$

3.2 Effet de la partie décimale du rapport de fréquence

Au fur et à mesure que l'amplitude de la vibration outil-pièce augmente, les mécanismes de génération de la topographie de surface progressent. Pour de faibles amplitudes de vibration outil-pièce, la vibration a peu d'influence sur le modèle de topographie de surface. Cependant, si l'amplitude de la vibration outil-pièce augmente, le motif de l'hélice n'est plus défini par la coupe continue, mais par la vibration outil-pièce. Pour ce dernier cas, qui comprend les motifs de topographie de surface II et III, l'influence de la partie décimale du rapport de fréquence sur le motif d'hélice de la topographie de surface est étudiée ci-dessous.

3.2.1 Signe de la partie décimale du rapport de fréquence

Pour les motifs de topographie de surface II et III, le nombre et le sens de l'hélice sont donnés par les équations Eq.15 – Eq.16 et Eq.17 – Eq.19. Dans les deux cas, le sens de l'hélice dépend du signe de la partie décimale du rapport de fréquence ε . Pour le motif de topographie de surface II, alors qu'une partie décimale positive du rapport de fréquence ε génère une hélice négative dans le sens opposé à l'avance de l'outil, une partie décimale négative du rapport de fréquence ε génère une hélice positive dans le même sens que l'avance de l'outil. Autrement, pour la topographie de surface III, le sens de l'hélice dépend non seulement du signe de la partie décimale du rapport de fréquence ε , mais aussi de la relation entre la valeur absolue de la partie décimale du rapport de fréquence ε et la différence de sous-échantillonnage N_m/N_k .

En outre, pour le motif de topographie de surface III, le nombre d'hélices N_h dépend également du signe de la partie décimale du rapport de fréquence ε . La Figure 4.1a-b présente l'erreur de topographie de surface calculée et l'erreur de profil de la direction d'avance pour un rapport de fréquence $f_r = 1,68$ et une amplitude de vibration $A = 50\mu\text{m}$. Les topographies de surface présentées à la Figure 3.3a et à la Figure 4.1a correspondent au modèle de topographie de surface III. Les deux topographies sont générées par une vibration outil-pièce qui a la même amplitude A , la même partie entière a et la même valeur absolue de la partie décimale $|\varepsilon|$ mais qui diffère par le signe de la partie décimale ε . La topographie de surface de la Figure 3.3a présente $N_h = 7$ hélices positives, tandis que la topographie de surface de la Figure 4.1a présente $N_h = 5$ hélices négatives. Les Figures 3.3a et Figure 4.1a montrent que dans le mécanisme de formation de la

topographie de surface III, le changement de signe de la partie décimale du rapport de fréquence modifie à la fois le nombre et le sens des hélices.

3.2.2 Valeur décimale du rapport de fréquence

Le motif d'hélice de la topographie de surface peut également changer pour différentes valeurs de parties décimales du rapport de fréquence ε . La Figure 4.2a-b présente l'erreur de topographie de surface de la pièce calculée et l'erreur de profil de la direction d'avance pour un rapport de fréquence $f_r = 2,48$ et une amplitude $A = 8\mu\text{m}$. Bien que les Figures 3.2a et Figure 4.2a présentent la même amplitude de vibration outil-pièce A , la même partie entière a et le même signe de la partie décimale ε , le mécanisme de formation de la topographie de surface est différent. Dans la Figure 4.2a, il y a interférence de l'outil et seuls les points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ qui tombent sur l'enveloppe inférieure laissent une marque d'outil. La hauteur totale du profil R_t se rapproche de l'amplitude de l'enveloppe de vibration outil-pièce A_k et la topographie de surface correspond au modèle de topographie de surface III.

La Figure 4.3a-b présente l'erreur de topographie de surface calculée et l'erreur de profil de la direction d'avance pour un rapport de fréquence $f_r = 2,25$ et $A = 200\mu\text{m}$ d'amplitude. La topographie de surface de la Figure 4.3a montre $N_h = 9$ lignes parallèles le long de la direction de l'avance. Un cas particulier se présente lorsque $1/|\varepsilon|$ est une valeur entière. Dans cette condition, dans le mécanisme de formation de la topographie de surface III, la différence de sous-échantillonnage rationnel (N_m/N_k) est égale à la valeur absolue du rapport de fréquence de la partie décimale ε et la modulation ondulatoire à basse fréquence de la vibration outil-pièce n'est pas visible ($f'_\varepsilon = 0 \text{ mm}^{-1}$, Eq.7). Au lieu de cela, les points de passage outil-pièce $x_k(z_k)$ forment des lignes parallèles sur la longueur de la pièce (Figure 4.3b). Il y a interférence de l'outil et seuls les points de passage outil-pièce de l'enveloppe inférieure laissent une marque d'outil sur le profil. Les points de passage outil-pièce $x_r(z_r)$ tombent par intermittence sur N_k lignes. La distance entre les points consécutifs qui tombent sur chaque ligne et l'avance apparente est $N_k f_z$.

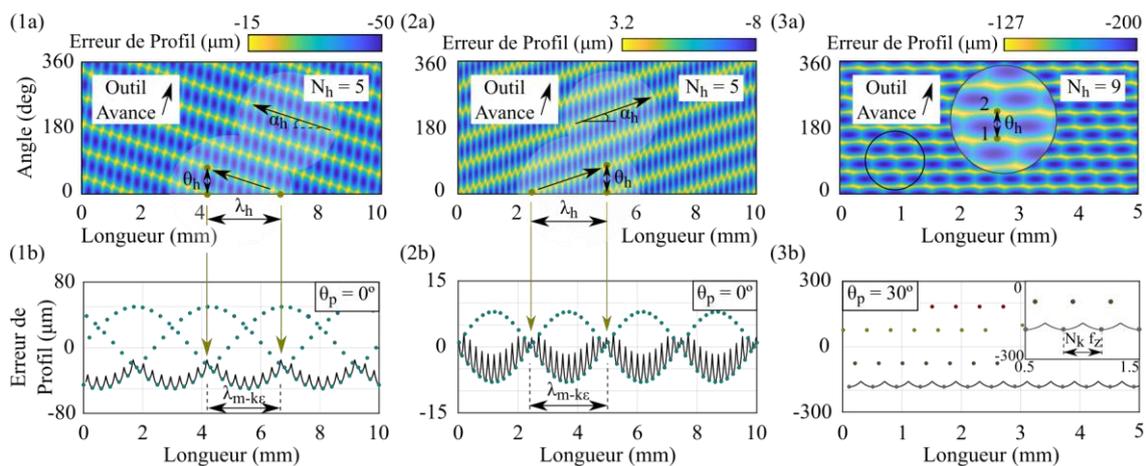


Figure 4 : Calcul (a) de la topographie de la surface de la pièce et (b) du profil de la direction de l'avance pour une avance par tour $f_z = 0,1 \text{ mm/tour}$, un rayon du nez de l'outil $r_\varepsilon = 0,8 \text{ mm}$ et un rapport relatif de fréquence et d'amplitude de vibration outil-pièce (1) $f_r = 1,68$, $A = 50 \mu\text{m}$; (2) $f_r = 2,48$, $A = 8 \mu\text{m}$ et (3) $f_r = 2,25$, $A = 200 \mu\text{m}$.

Les Figures 3 et Figure 4 montrent qu'une seule vibration peut générer plusieurs motifs d'hélice sur la topographie de la surface de la pièce. Les motifs d'hélice de la topographie apparente de la surface dépendent à la fois du rapport de fréquence et de l'amplitude des vibrations entre l'outil et la pièce. Trois principaux motifs de topographie de surface ont pu être définis, ainsi que les expressions analytiques de la longueur d'onde et de l'angle de l'hélice.

4 Conclusions

Cet article étudie l'influence d'une vibration unique de la machine-outil sur les modèles de topographie de surface de la pièce en tournage. L'interférence de l'outil et les artefacts d'échantillonnage sub-Nyquist sont des facteurs clés qui définissent les mécanismes de génération de la topographie de surface. Comme le confirment les relations analytiques, l'amplitude de la vibration outil-pièce et le rapport de fréquence influencent le mécanisme de formation des motifs de topographie de surface. En effet, les rapports de fréquence des vibrations de l'outil et de la pièce ont un effet indépendant sur la topographie de la surface. Des relations analytiques sont proposées pour corréler les motifs d'hélice de la topographie de surface avec la vibration de l'outil et de la pièce pour les trois principaux mécanismes de génération de la topographie de surface.

Remerciements

Cette recherche a été partiellement financée par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre du projet InterQ (accord de subvention n° 958357).

Références

- I. Amidor (2015) *Sub-Nyquist artefacts and sampling moiré effects*, *Royal Society open science*, vol.2, no.3, ID.140550
- Z. Dombovari, D.A. Barton, R.E. Wilson, G. Stepan (2011) *On the global dynamics of chatter in the orthogonal cutting model*, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol.46, no.1, pp.330-338
- M. Gil-Inchaurza, X. Beudaert, J. Munoa, D. Barrenetxea, J.A. Sanchez (2023) *Influence of a single machine-tool vibration on the workpiece waviness profile in turning*, *Advances in Science and Technology*, vol.132, pp.89-98
- N. Grossi, A. Scippa, L. Sallese, F. Montevicchi, G. Campatelli (2018) *On the generation of chatter marks in peripheral milling: A spectral interpretation*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.133, pp.31-46
- C.L. He, W.J. Zong, J.J. Zhang (2018) *Influencing factors and theoretical modeling methods of surface roughness in turning process: State-of-the-art*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol.129, pp.15-26
- D.S. Kim, I.C. Chang, S.W. Kim (2002) *Microscopic topographical analysis of tool vibration effects on diamond turned optical surfaces*, *Precision Engineering*, vol.26, no.2, pp.168-174
- R. Merino, D. Barrenetxea, J. Munoa, Z. Dombovari (2019) *Analysis of the beating frequencies in dressing and its effect in surface waviness*, *CIRP Annals*, vol.68, no.1, pp.353-356
- S. Takasu, M. Masuda, T. Nishiguchi, A. Kobayashi (1985) *Influence of study vibration with small amplitude upon surface roughness in diamond machining*, *CIRP annals*, vol.34, no.1, pp.463-467

L. Zeqin, W. Sujuan, C. Xindu, T. Suet, Y. Ziqiang, L. Junhui (2018) Modeling and prediction of surface topography with three tool-work vibration components in single-point diamond turning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.98, pp.1627-1639

S.L. Zhang, S. To, G. Q. Zhang, Z.W. Zhu (2015) A review of machine-tool vibration and its influence upon surface generation in ultra-precision machining, *International journal of machine tools and manufacture*, vol.91, pp.34-42

S.J. Zhang S. To (2017) Spindle vibration influencing form error in ultra-precision diamond machining, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol.231, no.17, pp.3144-3151

L. Zhou, K. Cheng (2009) Dynamic cutting process modelling and its impact on the generation of surface topography and texture in nano/micro cutting, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol.223, no.3, pp.247-266