

Prédire la rugosité de surface?: bien plus qu’une formule

15 juillet 2026, 10:00

Tom Jacobs

De la formule classique à une prédiction plus fiable

Depuis plusieurs décennies, la formule classique de rugosité sert de point de départ pour prédire la rugosité de surface. Pourtant, dans la pratique, les valeurs mesurées sont souvent nettement supérieures à celles prédites par la théorie. Dans le cadre du projet «?COOCK+ 4.0 Accélération de la maturité?» de la VLAIO, Sirris et la Haute École VIVES développent un modèle destiné à expliquer cet écart.

La formule classique reste un bon point de départ

La rugosité de surface est l’un des principaux paramètres de qualité en usinage. Elle est pourtant difficile à prédire. Une pièce peut présenter une rugosité Ra de 1,2?µm, alors que la valeur visée était de 0,8?µm. Pourtant, les réglages de la machine, l’outil et le programme CNC sont restés inchangés.
Conséquence?? Des contrôles supplémentaires, une reprise d’usinage, voire la mise au rebut de

la pièce.

La formule classique fournit une limite inférieure théorique?:

$Ra = f^2 / (32 \cdot r)$

Où f représente l’avance et r le rayon de bec de l’outil. Cette formule permet d’obtenir deux règles empiriques bien connues?: diviser l’avance par deux améliore la rugosité d’un facteur quatre, tandis que doubler le rayon de bec réduit la rugosité de moitié environ.

Dans la pratique, les valeurs mesurées sont toutefois presque toujours supérieures. Cela s’explique par le fait que la formule repose sur des conditions idéales?: un outil parfaitement affûté, une machine rigide, un matériau homogène et l’absence de vibrations.



Pourquoi théorie et pratique divergent

Trois mécanismes expliquent l’essentiel de l’écart entre la rugosité de surface théorique et celle mesurée.

1. Comportement du matériau

Lors de l’usinage de matériaux tels que le titane, les aciers inoxydables austénitiques ou certains alliages d’aluminium, une arête rapportée peut se former. Ce phénomène modifie la géométrie

effective de coupe et augmente la rugosité de surface. C’est pourquoi un facteur matériau, propre à chaque famille de matériaux, est souvent utilisé.

2. Usure de l’outil

Au fil de l’usinage, l’outil s’use progressivement et sa géométrie évolue. L’usure en dépouille entraîne une augmentation des frottements et de la chaleur, ce qui accroît la rugosité de surface. C’est pourquoi de nombreux modèles intègrent également un facteur lié à l’état de l’outil.

3. Comportement dynamique de la machine

La machine elle-même joue également un rôle important. Les vibrations, les phénomènes de broutage (chatter) ainsi que la flexion de l’outil ou de la pièce laissent directement leur empreinte sur la surface usinée. Ces phénomènes sont totalement ignorés par la formule classique.

En intégrant ces facteurs, on obtient un modèle plus représentatif de la réalité?:

Ra ? k??? · C???? · f² / (32 · r)

Le facteur matériau (kmat) et le facteur lié à l’état de l’outil (Ctool) rendent la prédiction beaucoup plus fiable et exploitable en pratique.

La recherche associe physique et données machine

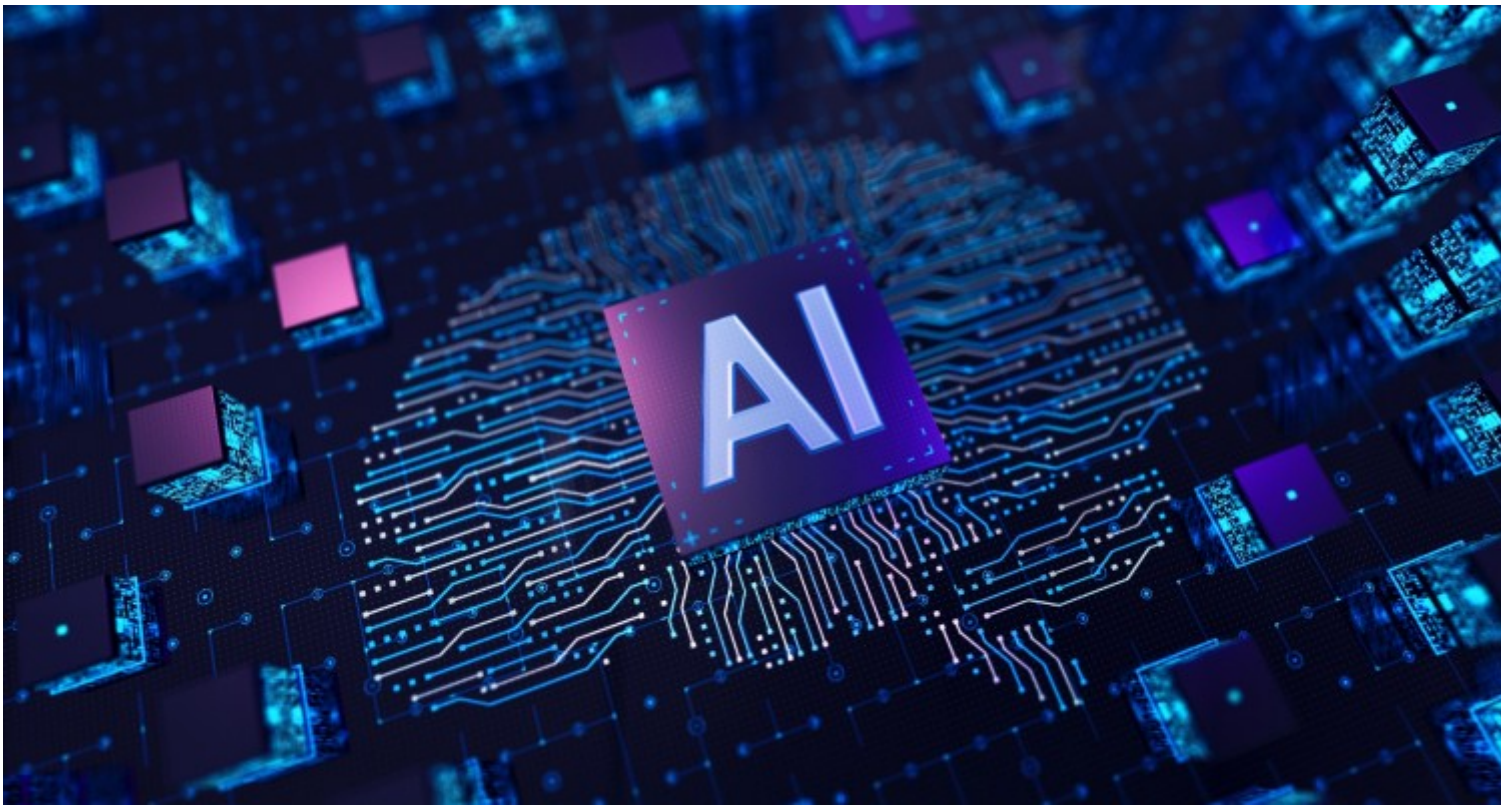
Cette approche n’est pas nouvelle. Elle s’inscrit dans une orientation de recherche clairement établie, qui consiste à enrichir progressivement la formule géométrique classique par des informations complémentaires sur le procédé.

Muñoz-Escalona et Maropoulos (2015) ont montré qu’un modèle purement géométrique de surfaçage pouvait atteindre une précision de près de 98?%, à condition de prendre également en compte le faux-rond et la géométrie de la plaquette.

Martínez-Arellano et al. (2017), une référence étroitement liée à l’approche COOCK+, sont allés encore plus loin. Ils ont démontré que la puissance de la broche principale des machines CNC modernes, disponible en temps réel, pouvait être utilisée directement pour prédire la rugosité de surface (Ra) en fonction de l’usure de l’outil (VB). Leur modèle s’appuie sur l’IA pour apprendre la relation entre la puissance, l’usure et la rugosité de surface.

Des publications plus récentes consacrées à l’apprentissage automatique informé par la physique (physics-informed machine learning, 2022-2024) combinent les formules classiques avec des réseaux neuronaux entraînés. Les formules physiques servent alors de point de départ, tandis que le modèle d’IA apprend à partir des données de mesure. Sur des jeux de données expérimentaux, ces modèles affichent des erreurs de prédiction de seulement 7 à 15?%. Dans le même temps, leurs prédictions restent conformes aux lois physiques connues.

Toutes ces études aboutissent à une même conclusion. La formule classique n’est pas remplacée, mais constitue le socle sur lequel viennent s’appuyer des facteurs correctifs et des modèles pilotés par les données.



De la théorie à la pratique dans le projet COOCK+

Dans le cadre du projet «?COOCK+ 4.0 Accélération de la maturité?» de la VLAIO, Sirris et la Haute École VIVES appliquent cette même approche. La plateforme de mesure mobile s'appuie sur la formule classique et la combine avec les propriétés des matériaux et les données machine.

Dans le cas du surfaçage du titane (Ti6Al4V), par exemple, la formule géométrique prédit une rugosité Ra d'environ 0,21?µm. Après correction en fonction du matériau, cette valeur passe à environ 0,38?µm. Lorsque l'état de l'outil est également pris en compte, la prédiction atteint environ 0,6?µm. La valeur effectivement mesurée se situe entre 1,0 et 1,2?µm.

L'écart restant s'explique par un niveau de vibrations plus élevé et par une usure plus avancée de l'outil. C'est précisément ce qui fait la valeur du modèle?: non seulement il prédit la rugosité de surface, mais il permet également d'identifier l'origine de la perte de qualité.

Que pouvez-vous déjà faire aujourd'hui??

Il n'est pas nécessaire de recourir d'emblée à des modèles d'IA complexes. Même avec des moyens limités, vous pouvez déjà améliorer la capacité de prédiction de votre procédé.

- Utilisez la formule classique pour vérifier, dans un premier temps, si les exigences de rugosité sont réalistes
- Enregistrez systématiquement les valeurs Ra mesurées pour différents matériaux et outils
- Suivez les données machine, telles que la puissance de la broche et les vibrations, afin de détecter rapidement les écarts

Vous constituerez ainsi progressivement un jeu de données précieux, qui pourra ensuite servir de base à des modèles de prédiction plus avancés.

De la recherche à la pratique

Dans le cadre du projet «?COOCK+ 4.0 Accélération de la maturité?» de la VLAIO, Sirris et la Haute École VIVES développent conjointement des méthodes permettant de mieux prédire et d'optimiser les procédés d'usinage. Un livre blanc consacré à la rugosité de surface est disponible. Il présente en détail la théorie, l'état actuel de la recherche et les différentes pistes de mise en œuvre. Des essais de faisabilité sur vos propres machines sont possibles jusqu'au début de l'année 2027.

Découvrez le projet

Vous souhaitez en savoir plus sur la rugosité de surface en usinage ?

Téléchargez le casebook « Rugosité de surface en usinage » et découvrez comment les données issues des capteurs et des machines peuvent compléter les modèles traditionnels. Découvrez comment obtenir des prévisions plus fiables, adaptées à votre environnement de production réel.

Téléchargez le casebook (uniquement en néerlandais)

Passez à la prédiction de la rugosité de surface

Vous souhaitez savoir avec quelle précision la rugosité de surface peut être prédite sur vos propres machines ? Ou vous envisagez un essai de faisabilité avec la plateforme mobile ? N’hésitez pas à contacter Sirris ou votre interlocuteur dans le cadre du projet «? COOCK+ 4.0 Accélération de la maturité?» de la VLAIO, Sirris et la Haute École VIVES

Contactez notre expert

Partners

Financé par

En collaboration avec

Auteurs



Tom Jacobs