

Physique de la coupe des métaux

par **François LEROY**

Ingénieur Civil des Mines, Docteur ès Sciences Physiques
Chargé de la Direction du Laboratoire d'Usinabilité
et de Mise en Forme d'ASCOMETAL (Groupe Usinor-Sacilor)

1. Évolution des techniques	B 7 040 - 2
2. La question du choix.....	— 2

L'usinage est sans doute la technique de mise en forme la plus ancienne. Pour toute personne qui n'est pas amenée à considérer l'état actuel de cette technique, cette constatation est antinomique avec des qualificatifs tels que moderne, motivant, plein d'avenir, etc. : ne s'agit-il pas d'un procédé de mise en forme grand gaspilleur de matière, destiné à céder la place à brève échéance à des technologies plus sophistiquées ?

1. Évolution des techniques

Pour peu que l'on considère les évolutions récentes ou prévisibles dans les divers pays industrialisés du monde, on constate :

— la **très grande modernité de l'usinage** : de tous les procédés de mise en forme c'est sans doute le plus flexible. Plus que d'autres, il est en train de bénéficier des plus performants des outils informatiques (très grande rapidité de calcul), des progrès de la robotique, des développements de matériaux nouveaux pour la conception des machines, qu'il s'agisse des parties tournantes (broches avec roulements en céramique, broches à paliers magnétiques, etc.), des parties mobiles en translation (chariots en alliages légers, chariots en composites), des parties fixes (bâti en béton), enfin de la très grande diversité des nouveaux matériaux d'outils ;

— la **simultanéité des développements de cette technique avec ceux des autres technologies de mise en forme**. De moins en moins de pièces sont usinées directement dans la masse d'un produit laminé. Les procédés de forge et de moulage conduisent à des pièces brutes de plus en plus près des cotes, mais simultanément une précision accrue conduit à demander à l'usineur de réaliser des géométries et microgéométries inaccessibles par d'autres voies. L'usineur fera sans doute demain de moins en moins de copeaux, mais de plus en plus de surfaces ayant de meilleures qualités mécaniques, physiques et géométriques ;

— l'**émergence de nouveaux problèmes d'usinage**, car les produits usinés sont de plus en plus divers et un très grand nombre de produits nouveaux ont beaucoup de propriétés attractives mais une usinabilité médiocre (nouvelles fontes bainitiques alliées, alliages super-réfractaires, composites fibrés, aciers pour forge à froid, etc.).

La problématique moderne de l'usinage se situe dans cet environnement : *comment faire demain de la qualité au moindre coût avec des machines-outils qui nécessitent des usineurs de technicité très différente de celle de leurs anciens, avec des outils dont la conception doit être repensée et avec des matériaux à usiner d'usabilités très diverses.*

On assiste même à des remises en cause des vocations des diverses techniques d'usinage. La *compétition entre fraîsage et rectification* dans la masse existe depuis quelque temps déjà. Elle s'amplifie en raison des développements des rectifications avec des meules en nitrite de bore cubique à des vitesses de coupe qui peuvent atteindre, voire dépasser la vitesse du son dans l'air. Réciproquement, le fraîsage à très grande vitesse conduit à des états de surface équivalents à ceux d'une rectification classique avec une productivité très supérieure. Certains commencent à substituer à l'outil de tournage classique fixe par rapport au chariot une petite fraise montée sur une petite broche qui se déplace en translation. Doit-on encore parler de tournage ou bien de fraîsage ou encore de fraîsage-tournage ?

2. La question du choix

Le mécanicien est appelé à faire un métier de plus en plus passionnant, puisqu'il a à sa disposition les progrès des sciences et techniques de la mécanique, des matériaux, de l'électronique, de l'informatique, etc., mais aussi de plus en plus complexe. Il est confronté à faire quotidiennement des choix : choix d'investissements lourds de conséquences économiques, choix entre outils conventionnels et outils nouveaux souvent beaucoup plus chers (une plaque en nitrite de bore cubique CBN coûte dix fois plus cher qu'un outil en carbure de tungstène WC), choix des paramètres de programmation des commandes numériques, jusqu'à un certain point choix de la variante la plus facile à usiner du matériau porté sur le plan de la pièce, etc.

Les critères de ces choix sont de plus en plus interdépendants. Ainsi la qualité et le coût d'une pièce usinée dépendent :

- des interférences pièce-outil fonctions :
 - de la microgéométrie de la pièce,
 - de l'écrouissage de la peau,
 - des contraintes résiduelles,
 - des déformations,
 - des propriétés d'usage (endurance, tenue à la corrosion, etc.),
 - de l'endommagement des outils dû aux contacts pièce-outil et copeau-outil,
 - du choix des principaux paramètres de programmation (vitesses, avances, passes, etc.),
 - du choix des géométries d'outils,
 - du choix des nuances d'outils, etc. ;
- des interférences outil-machine fonctions :
 - des contraintes de programmation (élasticité des assemblages, etc.),
 - de la rigidité du contact pièce-outil,
 - de la facilité du montage et des coûts des changements d'outils,
 - de l'automatisation des alimentations d'outils, etc. ;
- des interférences pièce-machine, en particulier :
 - la facilité et l'automatisation du montage des pièces,
 - le régime vibratoire de la pièce, etc. ;
- des interférences pièce-outil-machine, en particulier :
 - la tenue mécanique des outils avec des conséquences sur le choix des géométries et nuances d'outils,
 - la thermique pièce-outil-broche avec des conséquences sur la précision géométrique, etc.

Pour être aidé dans ces choix, plusieurs démarches sont possibles.

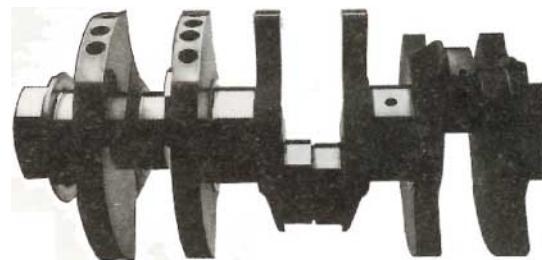
■ **La modélisation** : elle n'a pas encore en usinage les développements qu'elle a pour d'autres procédés de mise en forme (forgeage ou moulage par exemple). Cela s'explique, d'une part, en raison de la complexité des interactions pièce-outil-machine et, d'autre part, parce que les enjeux économiques sont un peu différents. En forge, le coût des outillages rapporté à celui des pièces est tel qu'il est exclu de faire une approche expérimentale pour optimiser une fabrication : on n'a pas le droit à l'erreur. En usinage, le coût relatif des outillages est nettement plus modeste. Toutefois, cette remarque sera de moins en moins juste pour au moins trois raisons :

- la croissance du coût horaire sur machine, en relation avec le prix des investissements ;
- la croissance du prix des outillages : une meule en CBN sur rectifieuse coûte couramment plusieurs dizaines de milliers de francs ;
- le coût des délais.

L'article *Modélisation de la coupe des métaux* [B 7 041] fait le point sur l'avancement des méthodes de modélisation, soit purement mécaniques, les plus simples, soit thermomécaniques, plus réalistes mais plus complexes.

■ **L'optimisation** : la mise au point d'algorithme de plus en plus performants et l'accès à des bases de données permettent de déterminer les conditions de coupe et les outillages dont le choix conduit à faire des pièces au moindre coût. La validité du résultat est toutefois largement dépendante de la fiabilité de la loi des endommagements cumulés des outils de coupe.

L'article *Endommagement des outils de coupe* [B 7 042] présente les principaux mécanismes de dégradation des outils et décrit les méthodes de mesure de leur intensité. Il va de soi que ces connaissances ont une double finalité : elles sont indispensables pour le progrès des matériaux usinés et usinants, et elles permettent de préciser le domaine de validité des données qui enrichissent les banques ; elles sont la base d'une détermination automatique quantitative (logiciels de programmation) ou semi-quantitative (systèmes experts) des conditions de coupe.



Vilebrequin : quand un usineur veut illustrer ce qu'est une belle pièce mécanique, il présente fréquemment des réalisations spectaculaires unitaires ou de séries très petites ayant nécessité un très grand nombre d'heures d'usinage. La plupart des pièces de mécanique automobile fabriquées en très grande série sont aussi des exemples illustratifs de l'importance technique et économique de l'usinage et de l'usinabilité.

Le cas de la **bielle** est significatif puisque la forme d'une telle pièce est ébauchée par forgeage estampage (bielles en acier) ou par moulage (bielles en fonte) et qu'une grande partie de sa surface reste non usinée. On pourrait donc penser que l'usinage des bielles (alésages, trous de graissage, trous de fixation, etc.) réalisé sur des lignes de machines-outils spécialement conçues pour faire cette unique géométrie de pièces ne représente qu'une part faible de son prix. La plupart des constructeurs automobiles ou de leurs sous-traitants ont publié ces dernières années des bilans faisant état d'un coût d'usinage égal à 50 % environ du prix de la bielle finie.

Le **vilebrequin** est un autre exemple caractéristique d'une pièce forgée en acier ou moulée en fonte dont le coût des usinages complexes est très élevé (entre 40 et 50 % du prix d'un vilebrequin). Lorsqu'il est en acier, le choix d'une nuance ayant une usinabilité élevée tout en ayant d'excellentes propriétés d'usage peut conduire à des gains très importants. À titre d'exemple, un acier à dispersoïdes de composition 35MV7r ayant une structure bainitique obtenue par refroidissement contrôlé après forgeage est utilisé avec succès pour la fabrication d'environ 2 000 vilebrequins par jour. Le remplacement d'un acier standard (de type 42CD4 trempé revenu) par ce nouvel acier a conduit l'usineur (1) à relever les fréquences de changement d'outils de 30 % tout en permettant un accroissement des vitesses de coupe. Globalement, le coût de l'usinage a été réduit de 15 %, économie qui s'ajoute à celle qui résulte de la suppression du traitement thermique.

Foret hélicoïdal présent dans tout atelier de mécanique : cet outil d'usage généralisé a donné lieu ces dernières années à des innovations très importantes et il continuera d'être l'objet d'études très poussées concernant aussi bien le matériau substrat de la partie coupante, le matériau de la queue, l'éventuel revêtement de la partie coupante, la géométrie de l'hélice, la forme des goujures, l'état de surface des zones sur lesquelles frotte le copeau ou le trou généré (goujures et listel), la géométrie de l'affûtage, la superposition des arêtes, etc.

Sur cette photographie est présenté un foret en carbure de tungstène micrograin (haute ténacité), revêtu d'une couche de nitride de titane déposé par voie physique (procédé PVD). On peut observer l'état de surface très brillant des goujures, l'amincissement de la pointe, la forme courbe des deux arêtes. Chacune de ces caractéristiques répond à un souci d'accroissement de productivité (gain de vitesse de coupe, réduction des efforts de perçage, etc.) et/ou d'amélioration de la qualité géométrique et micrométrique des trous. Si l'on voulait résumer toute l'évolution des dernières années, on pourrait dire qu'en est passé de l'ère des forets utilisés pour faire des trous à l'ère des forets employés pour faire du perçage.

(1) Résultats présentés par PSA et Ascométal à Pittsburgh en 1991 : *International Conference on processing, microstructure and properties of microalloyed and other modern HSLA*.



Fraiseuse TGV 5 axes Forest Line (Brisard Machines-Outils) : machine utilisée pour la superfinition de matériaux ferreux (fonte et aciers), exemple très significatif de la très haute technicité des machines-outils modernes. On imagine la complexité des problèmes qui doivent être résolus à partir des chiffres des performances telles que les vitesses d'avances sur les 3 axes : 15 000 mm/min et les accélérations : 1,5 m/s², etc.

(1) Résultats présentés par PSA et Ascométal à Pittsburgh en 1991 : *International Conference on processing, microstructure and properties of microalloyed and other modern HSLA*.

■ **Les plans d'expérience en atelier** : mis en place avec toute la rigueur nécessaire de l'analyse statistique, ils permettent de déterminer et de hiérarchiser les paramètres qui caractérisent le poste de travail et le système tribologique pièce-outil copeau et qui conditionnent la solution d'un problème d'usinage. Pour mener à bien des études de ce type, le recensement effectué dans l'article *Endommagement des outils de coupe* [B 7 042] peut être utilisé pour établir des plans d'essais ni trop lourds, ni trop simplistes.

Beaucoup d'efforts ont été jusqu'à maintenant consacrés à la productivité des machines-outils, mais assez peu à la **qualité des surfaces usinées** dont dépend un grand nombre de propriétés mécaniques des ensembles de pièces mécaniques. L'article *Usinage et usinabilité* [M 725] apporte cet éclairage complémentaire.

Dans ces différents articles, nous avons respecté les notations employées par chaque auteur pour désigner les différents angles, vitesses et dimensions : elles sont le fruit de diverses habitudes ou normalisations. Cependant, pour faciliter la compréhension du lecteur peu familiarisé avec les problèmes de coupe, nous avons réuni les principales notations utilisées dans les articles dans le tableau suivant, auquel nous avons ajouté pour chaque mot la traduction anglaise et allemande.

	Grandeur		Article [B 7 041]	Article [B 7 042]
Angle de dépouille	Clearance angle	Freiwinkel		α
Angle de taillant	Wedge angle	Keilwinkel		β
Angle de coupe	Rake angle	Spannwinkel	γ	γ
Largeur de coupe	Width of cut	Spannungs-breite		b
Angle de frottement	Friction angle	Reibungswinkel	λ	
Angle du plan de cisaillement (primaire)	Shear angle	Scherwinkel	φ	φ
Angle de direction d'arête	Tool cutting edge angle	Werkzeug-Neigungswinkel		κ
Épaisseur de coupe	Undeformed chip thickness	Spannungsdicke		h
Avance	Feed	Vorschub	s	f
Épaisseur du copeau	Chip thickness	Spanndicke	ℓ	h_c
Profondeur de passe	Depth of cut	Schnitttiefe	w	a
Vitesse de coupe	Cutting speed	Schnittgeschwindigkeit	U_0	V
Vitesse du copeau	Chip speed	Spanngeschwindigkeit	U	V_c
Vitesse d'avance	Feed speed	Vorschubrichtungswinkel		V_f