

Procédés d'usinage

Présentation

par **Éric FELDER**

Ingénieur civil des Mines de Paris

Docteur ès sciences

Maître de recherches à l'École des mines de Paris

Responsable adjoint du Groupe « surfaces et tribologie »
au Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF)

1. Aspects généraux	B 7 000 - 2
1.1 Importance économique de l'usinage	— 2
1.2 Principaux procédés	— 3
2. Aspects spécifiques de chaque classe de procédés	— 3
2.1 Procédés de coupe	— 3
2.2 Procédés par abrasion	— 7
2.3 Procédés physico-chimiques ou non traditionnels	— 9
3. Performances comparées des divers procédés	— 10
3.1 Usinabilité des matériaux par les divers procédés	— 10
3.2 Débit de matière et puissance nécessaire	— 11
3.3 Propriétés des pièces usinées	— 12
3.4 Aspects économiques	— 14
4. Perspectives	— 14
5. Annexe : Évolution de la production de machines-outils pour le travail des matériaux métalliques	— 14
Références bibliographiques	— 16

Cet article introduit l'ensemble de la rubrique « **Usinage** ». La mise en œuvre des opérations d'usinage pour réaliser une pièce ou une famille de pièces est un problème complexe du fait de la **multiplicité des procédés** disponibles et de la **grande variété des spécifications des pièces et des propriétés des matériaux constitutifs**. Nous souhaitons par ce texte fournir au lecteur les éléments fondamentaux du problème et, à ce titre, son objectif est double :

- présenter les traits spécifiques de chacune des grandes classes de procédés d'usinage : coupe, abrasion et usinages non traditionnels ou procédés physico-chimiques ;
- comparer les performances de ces divers procédés selon les différents points de vue pratiques : possibilité d'application aux divers matériaux, débit de matière et puissance nécessaire, opérations d'usinage possibles, propriétés finales de la pièce et aspects économiques...

Nous renverrons le lecteur aux divers articles plus spécialisés de la rubrique où il trouvera des informations plus détaillées, voire dans des ouvrages spécialisés [1] [10]. Nous essaierons enfin de décrire les évolutions prévisibles de ces procédés dans les prochaines années.

1. Aspects généraux

1.1 Importance économique de l'usinage

On appelle **usinage** toute opération de **mise en forme par enlèvement de matière** destinée à conférer à une pièce des **dimensions** et un **état de surface** (écart de forme et rugosité) situés dans une fourchette de tolérance donnée. D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance non négligeable puisqu'il produit environ 2,5 % du produit national brut d'un pays développé.

• L'usinage concerne au premier chef **les matériaux métalliques** et la plupart des objets métalliques d'utilisation courante ont subi une ou plusieurs opérations d'usinage. Ces opérations s'insèrent dans la succession des opérations de mise en forme à deux niveaux principalement (figure 1) :

— soit comme **opérations de découpe d'une ébauche** destinée à être **laminée, forgée, filée, emboutie...** (cf. dans le traité *Matériaux métalliques*, « Mise en forme des métaux ») et, dans ce traité, « Travail des métaux en feuilles. Assemblage » ;

— soit comme **opérations de mise à la cote** de pièces préalablement **moulées** (cf. dans le traité *Matériaux métalliques*, « Fonderie et moulage »), **frittées**, filées, embouties, forgées ou **assemblées par soudage** ; elles peuvent alors précéder ou suivre des traitements

thermiques et/ou de surface (cf. dans le traité *Matériaux métalliques*, « Traitements thermiques » et « Traitements de surface »).

Il faut noter qu'une catégorie importante (d'un point de vue industriel et économique) de pièces usinées, avec très souvent de grandes difficultés techniques, est constituée des outillages de mise en forme.

• La mise en forme par usinage concerne également, mais de manière moins conséquente en général, **toutes les autres classes de matériaux** (céramiques, polymères, bois et matériaux dérivés, matériaux composites, verres, semi-conducteurs...), selon des modalités spécifiques, dépendant des caractéristiques du procédé et du matériau (cf. articles de la sous-rubrique « Usinage des matériaux non métalliques », en cours de développement).

■ Suite aux divers chocs pétroliers (1974...), le renchérissement du coût de l'énergie avait incité les industriels de la mise en forme des matériaux à substituer aux opérations d'usinage, peu économies en matière première et en énergie, des opérations **de mise en forme sans enlèvement de matière** comme le **formage** (forgeage à froid ou frittage). Dans l'industrie automobile, par exemple, la forge à froid s'est développée au détriment de l'usinage. Pour les matériaux dont le coût matière est très élevé, de telles substitutions sont très attractives ; ainsi, le frittage permet de réduire notamment la perte de matière dans la réalisation d'éléments de turbomachines en alliages réfractaires de l'industrie aéronautique. Toutefois, ces substitutions de procédés posent une foule de problèmes difficiles à résoudre et qui, de ce fait, les limitent fortement.

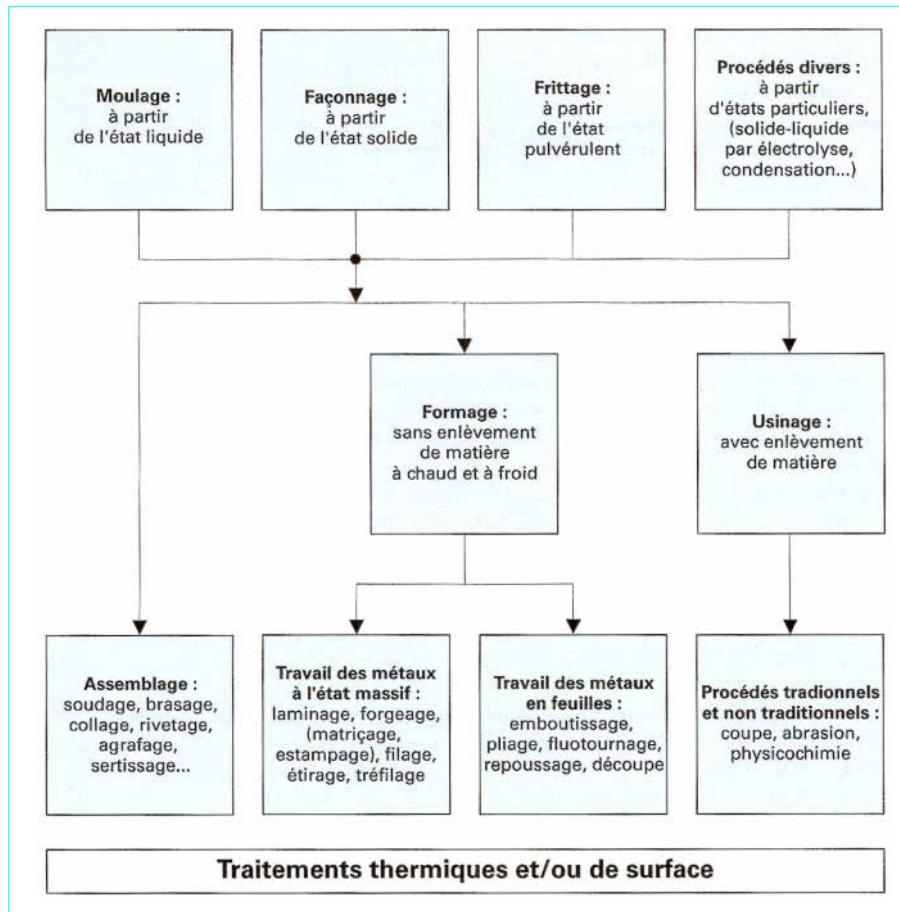


Figure 1 – Principaux procédés de mise en forme des matériaux métalliques

On rencontre des difficultés analogues dans les substitutions de matériaux ; par exemple, les carrosseries de véhicules automobiles sont actuellement principalement constituées d'acier et leur réalisation en alliage d'aluminium ou en polymère, envisagée depuis des années pour alléger les véhicules et diminuer les consommations de carburant, se fait attendre.

Le coût de matière première ou d'énergie n'est en fait qu'un des multiples facteurs de ce problème ; en outre, l'expérience montre que chaque procédé, comme chaque matériau, a son domaine d'excellence.

■ En conséquence, l'**optique actuelle** consiste plutôt à essayer de tirer parti, au mieux et de manière complémentaire, des performances des divers procédés de mise en forme, avec et sans enlèvement de matière, pour bâtir la gamme de fabrication la plus économique. Le concepteur a donc intérêt, sinon à disposer de la panoplie la plus large possible de procédés de mise en forme, du moins à bien connaître l'état actuel de leurs possibilités techniques.

Après avoir défini la pièce à réaliser (cf. articles « Cotation fonctionnelle » [BM 7 020] et « Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface » [B 7 010]), le concepteur va s'attacher à définir et optimiser la **gamme de fabrication**, problème difficile, dont la solution se situe le plus souvent à long terme après une série de modifications progressives de la gamme. Il sera parfois amené à modifier les caractéristiques de la pièce, qui ont été souvent définies au départ sans tenir compte des problèmes de réalisation et sont inutilement complexes (cf. article « Conception des gammes d'usinage » [B 7 025]).

1.2 Principaux procédés

Les procédés d'usinage sont extrêmement variés. Le terme « **usinage** » employé par abus de langage est consacré par l'usage pour tous les procédés qui suivent. Il est utilisé pour les procédés sans présence d'outil, mais avec intervention d'un milieu agressif.

On distingue assez souvent les procédés d'usinage mécaniques dits **traditionnels** des procédés d'usinage **non traditionnels** (*non traditional machining processes*) ; cette dernière appellation désigne des procédés qui sont apparus après 1945 en grande partie pour usiner des matériaux se prêtant difficilement aux techniques d'usinage classiques.

On peut également, schématiquement, classer les procédés d'usinage, selon les **phénomènes physiques** correspondants, en trois catégories principales :

■ Procédés de coupe

L'enlèvement de matière se fait par *action mécanique d'un outil coupant* ; la force appliquée induit la formation, à l'échelle macroscopique, de **un ou plusieurs copeaux**.

Il existe un grand nombre de procédés, dont les principaux sont :

- les procédés à **forte vitesse** ($\geq 15 \text{ m/min}$) et grand débit de matière (fraisage, tournage, perçage) ;
- les procédés de **vitesse plus faible** (sciage, rabotage, mortaiseage, brochage, taraudage et alésage...).

■ Procédés par abrasion

L'enlèvement de matière est dû à l'*action mécanique* d'un grand nombre de **grains d'abrasifs** de petite taille et de haute dureté. Ces grains agissent selon deux modalités différentes ; ils sont :

- soit liés à un **support solide** (abrasion à deux corps) : rectification, meulage ;
- soit transportés par un **milieu fluide** (abrasion à trois corps) : rodage et polissage à la pâte abrasive, usinage par ultrason, par un jet de fluide abrasif, ces deux derniers procédés étant classés parmi les procédés non traditionnels.

■ Procédés physico-chimiques

Ils sont tous qualifiés de non traditionnels. L'enlèvement de matière est réalisé (à l'exception de l'impact d'un jet d'eau) par des **actions non mécaniques** :

- action thermo-électrique d'un arc électrique (électro-érosion), d'un plasma ou d'un faisceau de lumière cohérente (laser) ou d'électrons ;
- action thermochimique de la flamme d'un chalumeau (oxycoupage) ;
- réaction électrochimique dans un électrolyte (usinage électrochimique) ;
- réaction chimique avec un liquide (usinage chimique).

2. Aspects spécifiques de chaque classe de procédés

2.1 Procédés de coupe

Les divers procédés sont décrits en détail dans les articles « Usinage par outils à arête(s) coupante(s) unique ou multiples » [B 1 648] [B 1 649]. Qualifiés de traditionnels, ils sont, de loin, les plus utilisés ; ils ont acquis une nouvelle jeunesse et une vitalité considérable grâce, en particulier, au développement, dans les années 60, des **machines-outils à commande numérique** qui regroupent une panoplie d'opérations de coupe : centres d'usinage [6], centres de tournage... (cf. articles « Commande numérique des machines-outils » [B 7 130] et « Fraiseuses et centres d'usinage » [B 7 160]).

La machine-outil à commande numérique (MO-CN) permet, en effet, de réaliser au moindre coût les séries moyennes de pièces, entre la machine-outil (MO) classique, bien adaptée à la fabrication de quelques pièces unitaires, et la **machine-transfert**, inventée par Henri Ford 1^{er} dans les années 1900 et qui est la meilleure solution pour les très grandes séries de pièces (figure 2). Ainsi, de 1975 à 1995, la plupart des pays développés occidentaux ont augmenté fortement leur production et leur utilisation de machines-outils (figure 3) ; les valeurs marchandes correspondantes, rapportées au nombre d'habitants, montrent que les leaders sont la Suisse et l'Allemagne (cf. Annexe § 5). À l'inverse, on note le sous-développement relatif des machines-outils aux États-Unis (USA) et, dans une moindre mesure, en France et en Grande-Bretagne (GB). Par ailleurs, les grandes possibilités de ces machines-outils et de l'automatique, les grandes possibilités de ces machines-outils et de l'automatique permettent de limiter les interventions humaines pour la réalisation de familles complètes de pièces ; pour cela, on regroupe les machines en ateliers flexibles (cf. article « Ateliers flexibles d'usinage » [B 7 030]).

L'opération de coupe consiste à transformer une ébauche, constituée d'un certain matériau, en une pièce par l'action d'outils animés d'un mouvement relatif par rapport à la pièce par la machine-outil. La figure 4 décrit de manière synthétique ce processus et ses caractéristiques principales.

■ D'un point de vue énergétique, le processus de formation du ou des copeaux absorbe une **puissance P** pour produire un **débit** volumique de copeaux D .

L'effort spécifique de coupe K est la puissance rapportée au débit de matière ; cette grandeur, homogène à une contrainte, est, en première approximation, proportionnelle à la **dureté HV** du matériau usiné ; elle est, également, fonction décroissante de l'épaisseur

usinée ou **avance f** (figure 5a) ; dans un certain domaine d'avance, elle s'écrit :

$$K = \frac{P}{D} \approx (0,2 \text{ à } 0,7) \text{ HV} \left(\frac{f_0}{f} \right)^n \quad (1)$$

où $f_0 = 1 \text{ mm}$. L'exposant n , de l'ordre de 0,4 selon Ghosh et Mallik [10] ; traduit un **effet de taille (size effect)** marqué dont l'origine physique est discutée brièvement ci-après, et qui incite les praticiens à travailler avec l'avance la plus grande possible.

Pour être exploitable, ce coefficient doit être associé à une combinaison de paramètres (technologie, matériaux usiné et usinant, type d'outil utilisé, vitesse...). Des banques de données, informatisées ou non, permettent son évaluation.

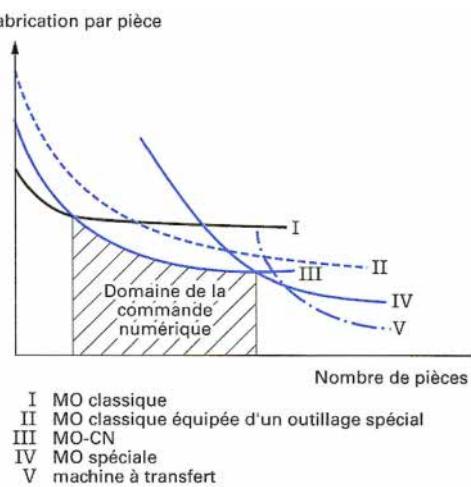


Figure 2 – Intérêt de la commande numérique pour la fabrication de séries de pièces

L'opération de coupe s'effectue aussi au prix d'**efforts, de couples et d'échauffements**, qui généralement évoluent et fluctuent au cours de l'opération et qui risquent de compromettre le respect des tolérances dimensionnelles. La structure de la machine-outil doit, notamment pour les opérations de finition, posséder une **grande rigidité**, être capable de réduire rapidement et fortement l'amplitude d'une vibration et être conçue ou choisie en fonction du cahier des charges des pièces à usiner (cf. article « Machine-outil : présentation [B 7 120] »). Pour améliorer la productivité et les tolérances dimensionnelles, le praticien a également intérêt à étudier attentivement l'assujettissement de la pièce à la machine ; il importe en effet de limiter le nombre de montages et de réduire au maximum les déformations de la pièce au cours de l'usinage.

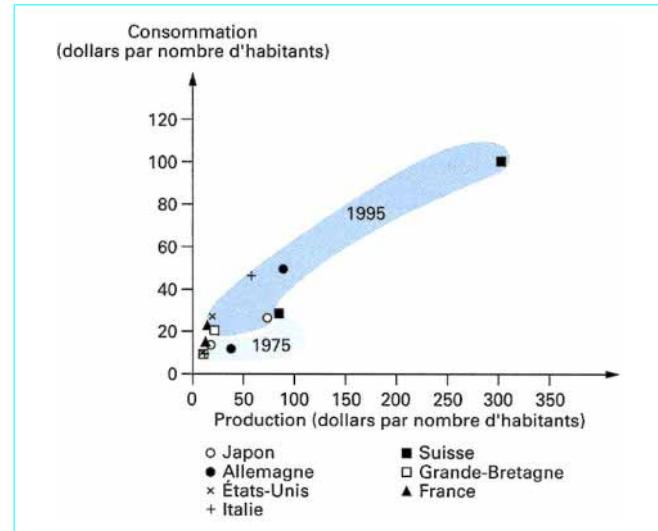


Figure 3 – Valeur marchande, rapportée au nombre d'habitants, des machines-outils produites et utilisées en 1975 et 1995, dans les principaux pays occidentaux

[selon statistiques fournies par [9] et CECIMO (1996)]

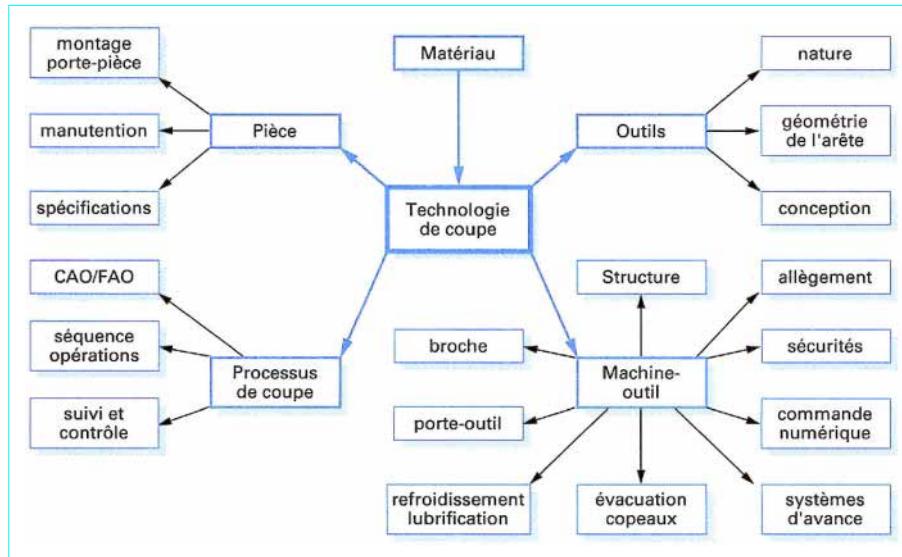


Figure 4 – Interactions entre la machine-outil et les aspects technologiques de la coupe

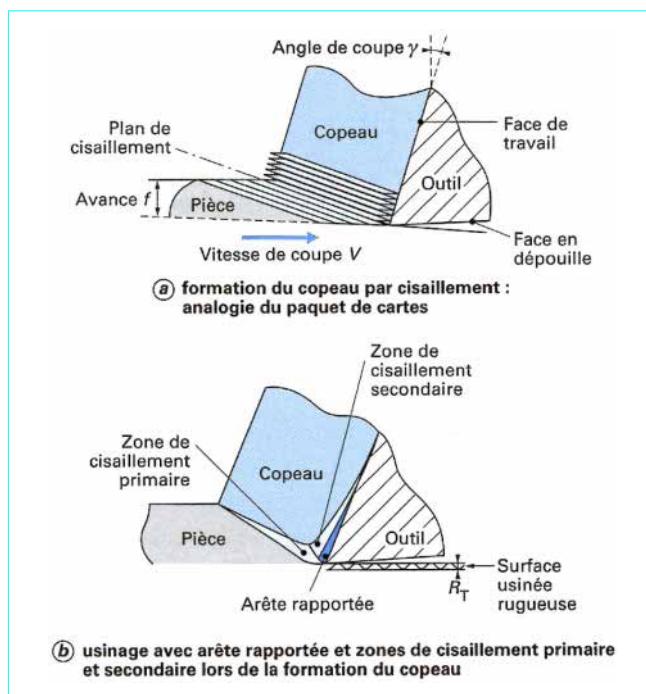


Figure 5 – Principe et caractéristiques fondamentales des procédés de coupe

Même si leur mise en œuvre a fortement évolué, les phénomènes physiques présents dans les procédés de coupe demeurent dans une large part inchangés, mais ne sont pas toujours clairement perçus par le praticien. C'est pourquoi nous voudrions ici les présenter succinctement, ainsi que leurs conséquences sur le choix des conditions de coupe. L'usinage avec formation de copeaux présente un paradoxe qu'illustre bien l'expression de l'effort spécifique [relation (1)] : la simplicité de son principe et la **complexité des phénomènes physiques** impliqués.

■ La coupe consiste, en effet, à séparer de la pièce un copeau à l'aide de l'arête tranchante d'un outil à l'instar d'une palette soulevant un paquet de cartes et les faisant glisser les unes sur les autres (figure 5a). Toutefois, pour les **alliages métalliques**, la matière donne naissance au copeau par passage dans la zone de cisaillement primaire (figure 5b) où elle subit en un temps très bref une **déformation plastique** et un **échauffement** considérables. En outre, le frottement quasi sec du copeau sur l'outil crée, au voisinage de l'interface à basse vitesse de coupe, une **arête rapportée** (figure 5b).

La rugosité totale R_T de la pièce usinée augmente avec les dimensions de l'arête rapportée et devient unacceptable pour une grande arête rapportée dont les dimensions (épaisseur, longueur) sont du même ordre de grandeur que l'avance. À grande vitesse, cette arête rapportée est remplacée par une zone de **cisaillement secondaire** qui élève très fortement la **température de l'outil** et conditionne directement sa **dégradation** (par abrasion, déformation plastique, réaction chimique, diffusion...) et sa durée de vie (cf. article « Endommagement des outils de coupe » [B 7 042]). Le comportement des alliages métalliques dans ces conditions extrêmes de déformation plastique, de vitesse de déformation et de température est encore l'objet de multiples travaux scientifiques [4] depuis ceux de Merchant (1994) (cf. article « Modélisation de la

coupe des métaux » [B 7 041]). Néanmoins, le praticien doit choisir au mieux ses paramètres de coupe dont les principaux sont l'**avance** f et la **vitesse de coupe** V (figure 5a).

■ Les **diagrammes d'usinabilité** établis à l'aide d'essais de coupe, comme ceux obtenus par Trent [2] illustrent bien les conséquences pratiques de ces phénomènes et peuvent servir de guide au praticien.

● Le **domaine** d'usinabilité d'un acier mi-dur usiné avec un outil carbure (de tungstène lié cobalt) se situe entre le domaine de formation d'une arête rapportée qui dégrade l'état de surface de la pièce, pour des avances et vitesses faibles, et le domaine de creusement par **cratérisation** de la face de travail de l'outil qui conduit à une ruine pré-maturée, pour des avances et vitesses élevées (figure 6a) ; toutefois, l'optimisation de la nuance de carbure permet d'élargir notablement ce domaine (figure 6b).

L'augmentation régulière des vitesses de coupe a ainsi été rendue possible par l'utilisation de **matériaux d'outil de plus en plus durs** [acières rapides (introduits par Taylor vers la fin du XIX^e siècle), carbures, céramiques, matériaux ultra-durs (carbure de bore et diamant polycristallins)], mais de **fragilité croissante**. Parallèlement, on a diminué l'**angle de coupe** γ (figure 7) jusqu'à des valeurs fortement négatives, seules compatibles avec une tenue correcte de l'arête d'un matériau très dur et fragile [5].

Une solution particulièrement intéressante et très employée consiste à utiliser des **outils revêtus de films minces** (épaisseur de quelques micromètres) pour concilier, tout en conservant un coût raisonnable, les impératifs de ténacité en volume élevé et de forte résistance superficielle à l'abrasion, corrosion, diffusion... (cf. article [BM 7 080] « Matériaux pour outils de coupe »).

● L'addition au cours de l'élaboration de l'alliage métallique d'éléments tels que le plomb dans les alliages cuivreux, le soufre et le manganèse dans les aciers permet d'élargir le domaine d'usinabilité vers les basses avances en réduisant la taille des arêtes rapportées (figure 8) ; il importe néanmoins de vérifier que l'incorporation de tels **additifs d'usinabilité** est compatible avec les autres phases de la mise en forme de la pièce et ses propriétés en service. Ces aspects, plus métallurgiques, sont traités pour les diverses classes d'alliages métalliques dans la rubrique « Aptitude à la mise en forme des métaux » du traité Métallurgie.

● La figure 9 montre que l'augmentation de **dureté** de l'alliage usiné réduit considérablement les avances et vitesses praticables, ce qui est une conséquence intuitive de la formule (1).

● On comprend bien que le domaine de l'**usinage très grande vitesse**, en développement actuellement, notamment pour les applications aéronautiques, ne correspond pas du tout aux mêmes valeurs de vitesse pour les superalliages (120 m/min), les alliages ferreux, de cuivre, d'aluminium (2 000 m/min), voire les polymères renforcés de fibres (cf. figure 10 et l'article « Fraisage des métaux à très grande vitesse » [B 7 250]).

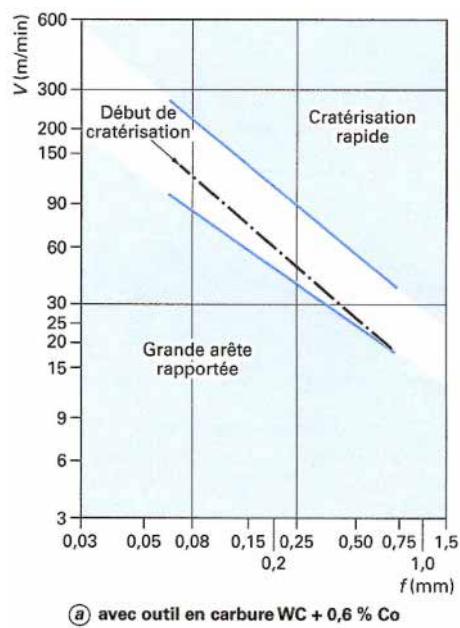
■ Le **lubrifiant** joue un rôle non négligeable dans les opérations de coupe :

— à grandes vitesses d'usinage, il assure le refroidissement de l'arête de coupe et réduit les arêtes rapportées résiduelles sur l'outil et sa vitesse de dégradation ;

— aux vitesses de coupe plus modérées, il diminue le frottement du copeau sur l'outil et facilite son extraction dans des procédés comme le perçage, le brochage ou le taraudage.

Mais la formulation du lubrifiant reste encore pour une large part empirique.

■ En dernier lieu, il faut être attentif au fait que la coupe transforme les propriétés mécaniques, chimiques et métallurgiques de la pièce sur une profondeur non négligeable et laisse subsister des bavures qu'il importe de réduire et d'éliminer.



(a) avec outil en carbure WC + 0,6 % Co

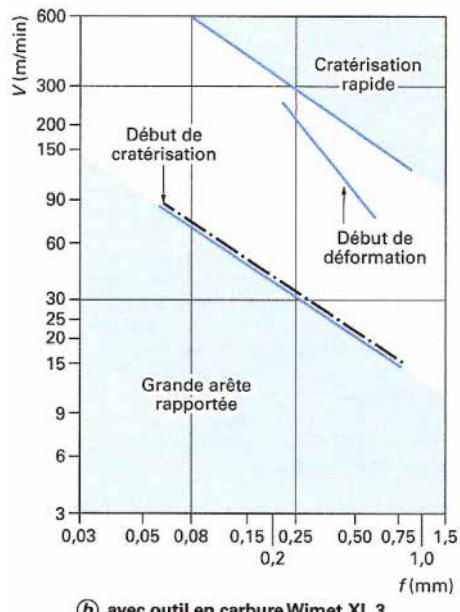


Figure 6 – Diagramme d'usinabilité d'un acier à 0,4 % C (HV 200) [2]

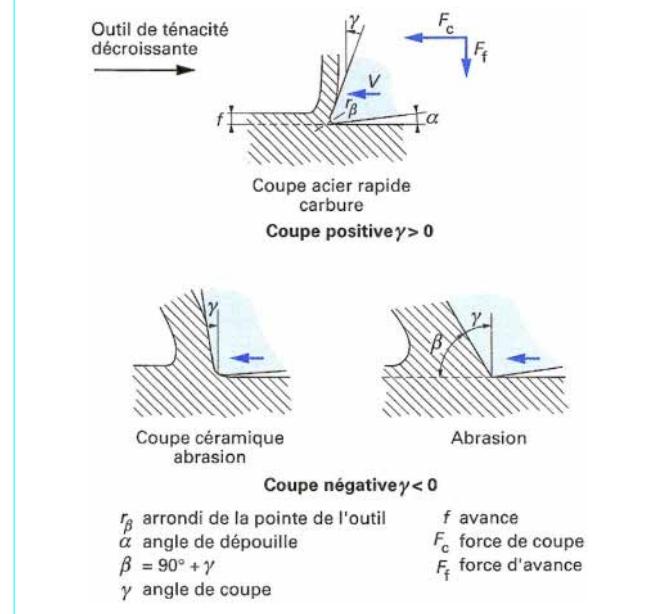


Figure 7 – Évolution de l'angle de coupe

avec les caractéristiques du matériau d'outil :

la coupé et l'abrasion d'un matériau ductile correspondent respectivement au cas d'angles de coupe voisins de zéro et fortement négatifs

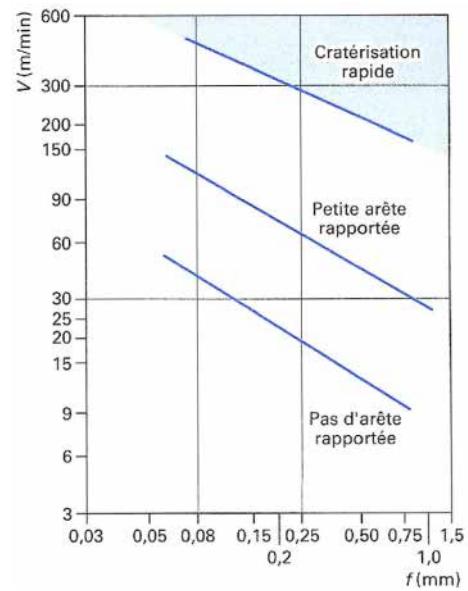


Figure 8 – Diagramme d'usinabilité avec outil carbure d'un acier doux à usinabilité améliorée [2]

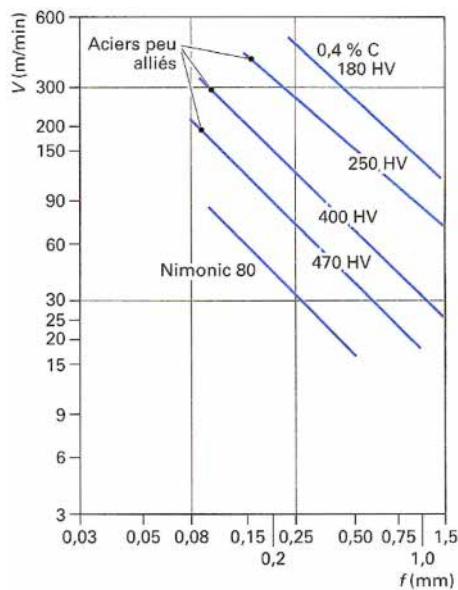


Figure 9 – Influence de la dureté de l'acier usiné sur les avances et vitesse initiant une déformation plastique d'un outil carbure [2] : pour chaque alliage, la déformation plastique de l'outil se produit pour les avances et vitesse dont le point représentatif se situe au-dessus de la droite correspondante

Le bois et les matériaux dérivés se prêtent particulièrement bien aux opérations de coupe à très grande vitesse (50 m/s ou 3 000 m/min), mais leur travail par coupe requiert de prendre en compte leurs propriétés mécaniques bien particulières et variables avec sa teneur en eau : forte anisotropie, viscoélasticité (cf. article « Mise en œuvre et usinage du bois [B 7 304] » et « Travail mécanique du bois » [B 7 305] [B 7 306] [B 7 307] [B 7 308] [B 7 309]).

2.2 Procédés par abrasion

Le mécanisme d'enlèvement de matière est ici plus difficile à appréhender pour le praticien, puisqu'il s'effectue à l'échelle microscopique des grains. Le matériau est soumis par les grains d'abrasif à une action similaire à celle des outils tranchants de la coupe, mais dans le domaine des très faibles avances et avec une distribution d'angles de coupe s'étendant vers des valeurs fortement négatives. En outre, le frottement parasitaire sur la face en dépouille et l'arrondi ne sont plus négligeables.

■ Le processus d'enlèvement de matière va dépendre de la **fragilité** du matériau.

● Les matériaux **peu fragiles ou ductiles** se déforment plastiquement de manière importante avant rupture dans un essai de traction ; tels sont la plupart des alliages métalliques courants, de dureté faible ou moyenne. L'enlèvement de matière s'effectue par formation de **micro-coopeaux** (figure 11b), mais au prix d'efforts spécifiques élevés. Ce point est illustré par la figure 12 relative à une opération de **coupe d'ultraprécision** (*ultra precision machining* [14]) d'un alliage d'aluminium avec un outil diamant :

- pour une avance décroissante (figure 12c), l'effort spécifique croît conformément à la relation (1) jusqu'à une valeur de 10 GPa ;
- pour les avances inférieures à 0,2 µm environ, la force d'avance F_f devient supérieure à la force de coupe F_c (figure 12b) ; on peut dire que l'opération s'apparente alors plus à un frottement qu'à un enlèvement de matière.

Des phénomènes analogues apparaissent lorsque l'angle de coupe devient fortement négatif, c'est-à-dire lorsque l'angle d'attaque du grain $\beta = \gamma + 90^\circ$ devient inférieur à 40° (figure 11a).

● Au contraire, les **matériaux fragiles** comme les verres ou les alliages métalliques très durs se détachent de la pièce du fait de la propagation de fissures sous le champ de contraintes et de déformation élastoplastique engendré par le contact avec les grains d'abrasif ; le débit de matière en est fortement augmenté.

■ Au total, l'opération d'usinage par abrasion a un **rendement énergétique** très inférieur à celui d'une coupe courante. Elle sera donc réservée aux opérations de **finition**, notamment sur les matériaux de haute dureté.

D'un point de vue plus global, l'expérience montre que le débit volumique de matière D enlevée par une meule de vitesse périphérique V appliquée contre un matériau de dureté HV avec une force F est fourni, en première approximation, par la relation :

$$D \approx k \frac{F V}{HV} \quad (2)$$

Le nombre sans dimension k qui caractérise le rendement de l'opération dépend de multiples facteurs, notamment la granulométrie des grains d'abrasifs (cf. article « Coupage thermique et coupage au jet d'eau » [BM 7 280]). De l'ordre de 0,05 sur des matériaux très ductiles comme les métaux purs (dans un système cohérent d'unités), il augmente, du fait des phénomènes décrits auparavant, avec la fragilité du matériau et peut atteindre 0,5 ou plus sur des minéraux fragiles (figure 13).

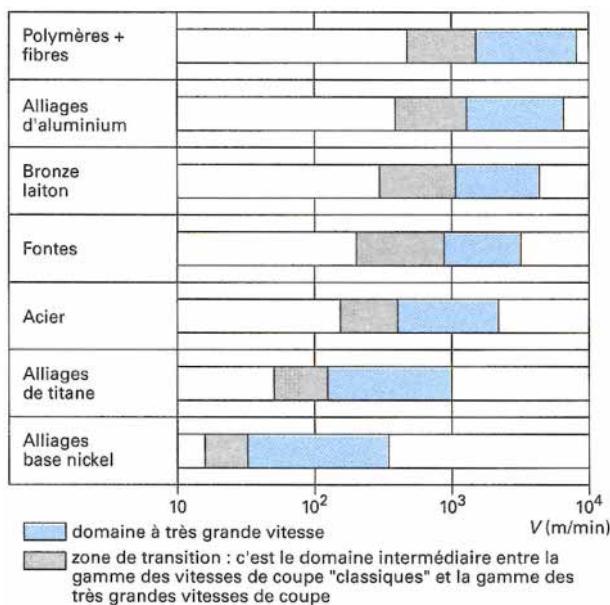
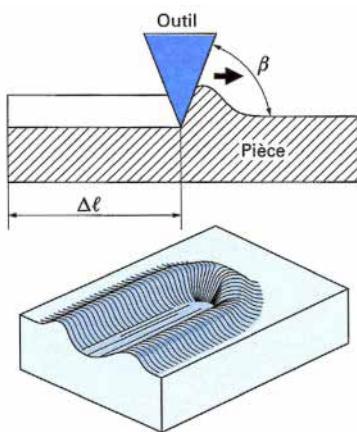
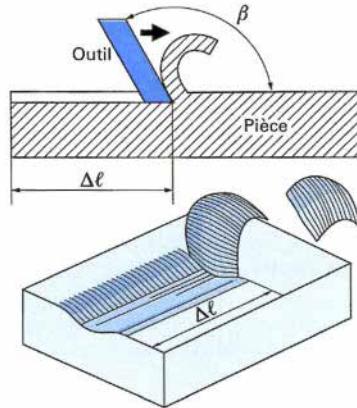


Figure 10 – Domaine de l'usinage à très grande vitesse de divers alliages métalliques et des composites à matrices organiques renforcés par des fibres [11]



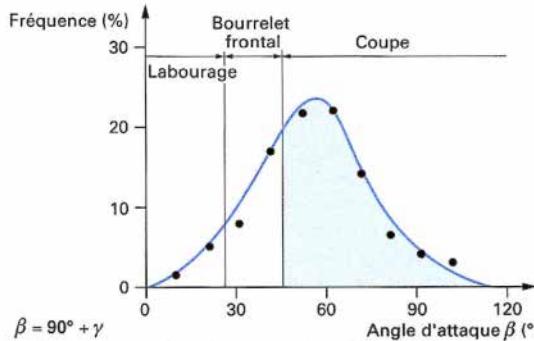
Le grain d'abrasif a tracé un sillon, déplaçant la matière dans des bourrelets latéraux, sans qu'il y ait perte de poids

(a) processus de labourage sans enlèvement de matière par un grain d'abrasif possédant un faible angle d'attaque β



Le grain d'abrasif a tracé un sillon. Une partie de la matière déformée forme un copeau qui est évacué : il y a perte de poids. Le volume disparu est proportionnel à la longueur de glissement $\Delta\ell$ et à l'aire de contact (profil transversal du sillon)

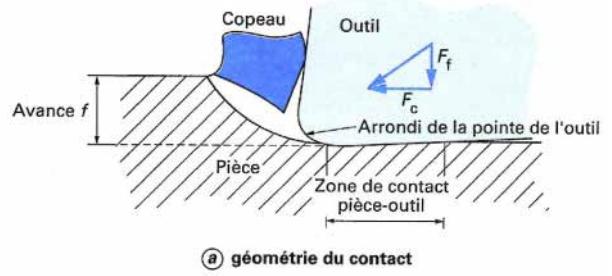
(b) processus de formation d'un copeau produisant un enlèvement de matière par un grain d'abrasif possédant un angle d'attaque β élevé



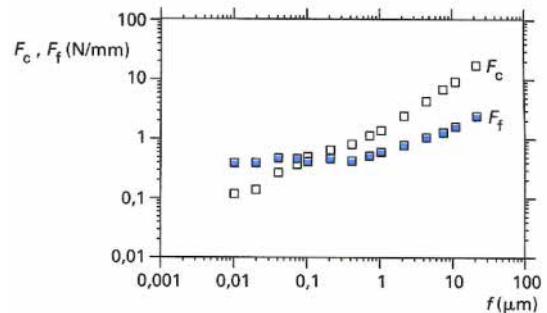
La fréquence est le nombre de grains d'abrasif d'angle d'attaque β par rapport au nombre total de grains d'abrasif

(c) distribution des angles d'attaque des grains d'abrasif d'une meule [13]

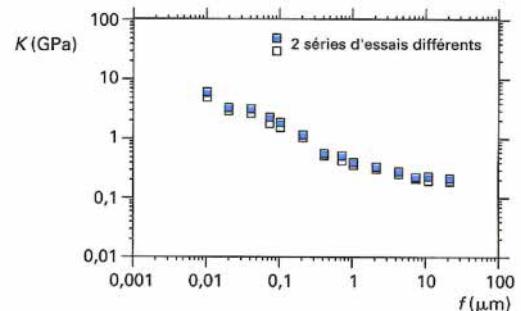
Figure 11 – Caractéristiques principales de l'usinage par abrasion d'un matériau ductile



(a) géométrie du contact



(b) évolution avec l'avance f des forces de coupe F_c et d'avance F_f



(c) influence de l'avance f sur l'effort spécifique de coupe K

Figure 12 – Micro-usinage orthogonal d'un alliage d'aluminium 6061-T6 [15]

La relation (2) décrit assez bien, en première approximation, l'influence de la dureté HV du matériau usiné sur le débit de matière tant que la dureté de l'abrasif HV_a excède de 20 % au moins HV ; lorsque cette condition n'est plus satisfaite, l'abrasif est encore capable d'ôter de la matière à la pièce, mais avec un rendement k qui décroît fortement quand le rapport $\lambda = HV/HV_a$ augmente (figure 14).

Ainsi un abrasif dont la dureté est deux fois moins élevée que celle du matériau de la pièce ($\lambda = 0,5$) ôte de la matière à une vitesse 100 fois plus faible qu'un abrasif bien adapté.

En conséquence, il est nécessaire d'utiliser des abrasifs de dureté croissante au fur et à mesure que l'on usine des matériaux de plus en plus durs, comme par exemple les matériaux à outil (cf. article « Abrasifs » [B 7 050]).

Le débit de matière dépend également beaucoup du matériau, de la meule et du type de meule, car le support des abrasifs influence (par ses propriétés mécaniques) l'opération.

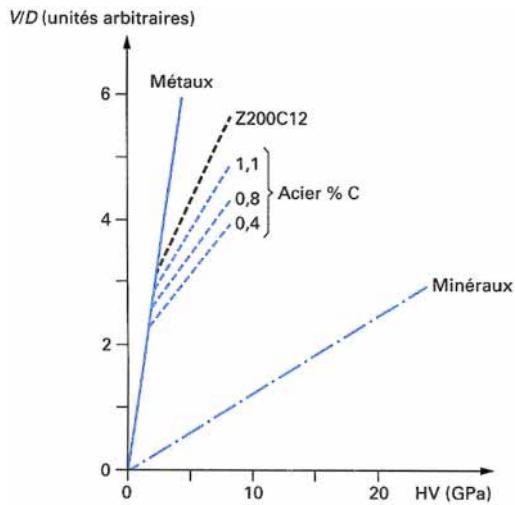


Figure 13 – Influence de la dureté du matériau sur la résistance à l'abrasion des métaux purs, de divers aciers et des minéraux [3]

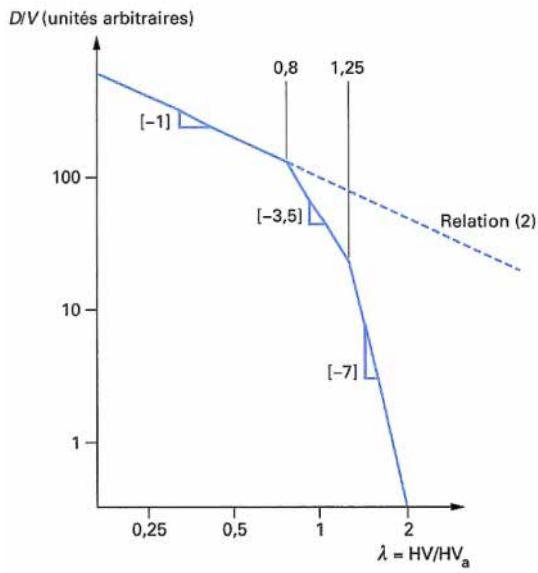


Figure 14 – Influence sur le débit de matière D du rapport dureté du matériau abrasé HV sur dureté de l'abrasif HV_a (à abrasif donné) [16]

■ L'usinage par abrasion peut également être effectué en communiquant un mouvement aux grains par l'intermédiaire d'un **fluide plus ou moins consistant** s'écoulant soit à faible vitesse sous l'**action d'un piston** (cf. article « Usinage par extrusion de pâte abrasive » [B 7 235]), soit à forte vitesse sous l'effet **d'un jet d'eau sous haute pression** (cf. article « Coupage thermique et coupage au jet d'eau » [BM 7280]), ou mis en vibration par des **ultrasons** (cf. article « Usinage par ultrasons » [B 7 240]). Dans de telles opérations d'abrasion à trois corps, les degrés de liberté des grains d'abrasif sont beaucoup plus importants et réduisent la capacité des grains à enlever de la matière (figure 15). Ces procédés vont donc être réservés à la finition des pièces ductiles (polissage, rayonnage, ébavurage) ou/et à l'usinage de matériaux fragiles.

2.3 Procédés physico-chimiques ou non traditionnels

■ Le procédé d'**usinage par électro-érosion** repose sur le fait que l'étincelle électrique éclatant entre deux conducteurs séparés par un fluide diélectrique produit une érosion préférentielle de l'anode, du fait d'un échauffement intense entraînant fusion et vaporisation. La cathode confère ainsi peu à peu sa forme à l'anode.

Une variante très utilisée pour découper des pièces en plaques consiste à utiliser comme cathode un fil (**découpe par électro-érosion à fil**). C'est actuellement le plus important des procédés physico-chimiques, car il permet, pour un coût raisonnable, l'usinage de matériaux métalliques très utilisés, mais de très faible usinabilité pour les procédés de coupe comme les matériaux à outils ou la réalisation de formes très complexes (moules de fonderie ou d'injection).

■ **L'usinage par jet fluide** met en jeu des fluides de natures diverses :

- flamme d'un chalumeau en **oxycoupage** ;
- gaz ionisé d'un **plasma** ;
- faisceau de lumière cohérente du **laser** ;
- faisceau d'électrons en **bombardement électronique** (plus rare).

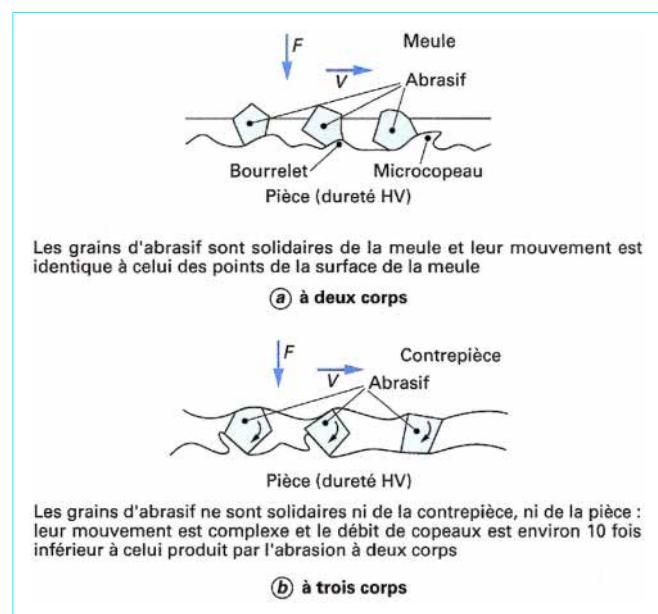


Figure 15 – Procédés d'usinage par abrasion

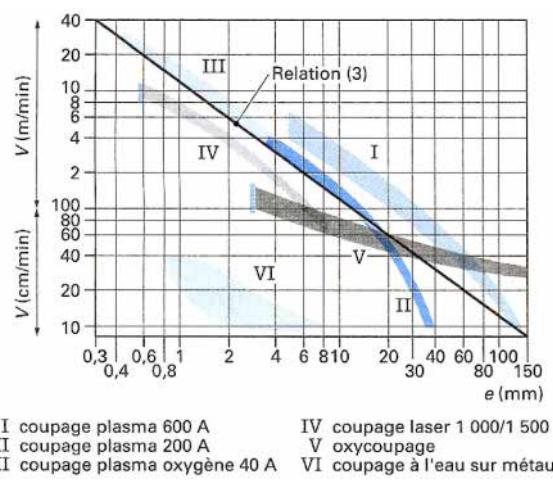


Figure 16 – Procédés de découpe de feuilles. Évolution de la vitesse de découpe V avec l'épaisseur e de la feuille pour les aciers peu alliés

Dans tous les cas, l'impact du jet échauffe fortement la pièce, permettant le perçage ou la découpe de matériaux en feuilles ou plaques plus ou moins épaisses.

L'impact d'un **jet d'eau** à grande vitesse permet de réaliser des opérations similaires sur des matériaux peu consistants comme les tissus ou le papier, l'addition de particules abrasives permettant l'usinage des matériaux plus durs et/ou fragiles comme les métaux ou les céramiques.

En première approximation, pour tous ces procédés, à l'exception du jet d'eau, beaucoup plus lent, la **vitesse de découpe V (m/min) des métaux décroît en raison inverse de l'épaisseur e (mm) de la pièce** selon la loi *moyenne* :

$$V \approx \frac{12}{e} \quad (3)$$

La figure 16, extraite de l'article « Coupage thermique et coupage au jet d'eau » [BM 7 280], précise la gamme d'épaisseurs et de vitesses effectivement accessible pour ces procédés. Ils sont en compétition mutuelle et se sont tous trouvés un créneau pratique, à côté des **procédés mécaniques de découpe par cisailage** (cf. articles « Découpage, poinçonnage » [B 7 561] et « Découpage fin » [B 7 564] de la rubrique Travail des métaux en feuille).

Il faut noter que la découpe laser produit des surfaces de grande qualité qui tendent à être la norme de référence pour les autres procédés de découpe.

Dans l'**usinage électrochimique**, le passage du courant électrique dans un électrolyte entre la cathode et la pièce, qui fait office d'anode, produit la dissolution progressive de la pièce sous forme d'ions. La forme de la pièce tend à se conformer à celle de la cathode qui fait office d'*outil pratiquement inusable*. L'**enlèvement de matière est décrit avec précision** par les lois de l'électrolyse découvertes par Faraday : le débit volumique de matière D est proportionnel à l'intensité I du courant :

$$D = \frac{AI}{\rho n F} \quad (4)$$

où A est la masse atomique du métal qui forme un ion de valence n ,

F la constante de Faraday (96 500 coulombs),

ρ la masse volumique du métal.

Ces deux caractéristiques spécifiques font que l'usinage électrochimique est, pour les matériaux conducteurs, le procédé potentiellement le plus prometteur pour réaliser diverses opérations (fraisage, perçage, ébavurage, rayonnage, polissage), mais il reste pour l'instant assez peu utilisé, sauf pour les pièces destinées à l'industrie aéronautique.

L'**usinage chimique** est utilisé pour la découpe de feuilles minces ou le façonnage de pièces sur une faible profondeur ; un bon exemple est la fabrication par photogravure de circuits imprimés. On masque à l'aide d'un vernis les parties de la pièce à préserver ; l'enlèvement de matière est obtenu par immersion de la pièce dans un liquide qui réagit chimiquement avec la pièce. La modulation du temps d'immersion permet de réaliser un véritable **fraisage chimique**. Très important dans l'industrie électronique, l'usinage chimique reste un procédé relativement confidentiel dans les autres secteurs industriels.

3. Performances comparées des divers procédés

Comme nous l'avons déjà évoqué, les procédés de coupe et de rectification permettent l'usinage des alliages métalliques courants dans les meilleures conditions économiques, ce qui explique leur grand développement. Le travail à la meule s'effectue de deux manières différentes :

— le **meulage** permet de réaliser des opérations de type ébavurage ou polissage ; on ne contrôle pas avec précision le mouvement de la pièce ;

— la **rectification** confère à la pièce une forme géométrique précise et une faible rugosité par un contrôle précis des mouvements de la meule et de la pièce.

Pour certaines opérations d'usinage ou pour l'usinage des matériaux difficiles à usiner avec les procédés traditionnels, les procédés non traditionnels constituent, toutefois, des solutions intéressantes. Nous allons donc ici comparer à divers points de vue les différents procédés d'usinage et ainsi fournir des éléments de choix pour la réalisation d'une pièce ou famille de pièces donnée. Ce problème se pose le plus souvent à l'occasion d'investissements envisagés pour augmenter la productivité d'une fabrication et le choix définitif ne pourra bien évidemment être arrêté qu'après une étude assez longue des spécifications de la famille de pièces concernées, une remise en cause plus ou moins importante de la gamme de fabrication et la consultation de fournisseurs des machines-outils correspondantes. Il faut noter que commencent à apparaître des logiciels d'aide à la sélection de ces procédés [12].

Les principaux critères de sélection sont les suivants :

— la plus ou moins grande facilité du procédé d'usinage à ôter le matériau de la pièce ou, de manière plus elliptique, l'usinabilité du matériau de la pièce vis-à-vis du procédé envisagé ;

— le rendement énergétique ;

— l'aptitude du procédé à réaliser la forme de la pièce ou à lui conférer son état de surface ;

— la précision dimensionnelle accessible ;

— le prix de revient de l'usinage.

3.1 Usinabilité des matériaux par les divers procédés

Le tableau 1 précise les possibilités d'application des différents procédés d'usinage aux divers types de matériaux. Il fait ressortir quelques faits marquants :

Tableau 1 – Possibilité d'application des divers procédés d'usinage aux divers matériaux [7]

Usinage	par ultrason	par jet abrasif	électro-chimique	chimique	par électro-érosion	par faisceau d'électrons	par faisceau laser	par arc à plasma	par coupe (fraisage)
Sigle anglais	USM	AJM	ECM	CHM	EDM	EBM	LBM	PAM	TM
Sigle français	UUS	UJA	UEC	UC	UEE	UFE	UFL	UAP	UT
MÉTAUX ET ALLIAGES									
Aluminium	C	B	B	A	B	B	B	A	A
Aciers	B	B	A	A	A	B	B	A	A
Superalliages	C	A	A	B	A	B	B	A	C
Titane	B	B	B	B	A	B	B	B	B
Alliages réfractaires	A	A	B	C	A	A	C	C	C
NON-MÉTAUX									
Céramiques	A	A	D	C	D	A	A	D	D
Polymères	B	B	D	C	D	B	B	C	B
Verre	A	A	D	B	D	B	B	D	C
Bois	D	B	D	D	D	D	B	D	A
Carbure	A	B	A	C	A	B	B		D
A = bonne application	B = application possible	C = application difficile	D = inapplicable						

Les matériaux métalliques **courants** s'usinent bien par les procédés de coupe et, compte tenu des avantages de ces procédés, les autres procédés leur sont assez rarement appliqués.

Par contre, l'usinage des alliages métalliques **de très haute dureté** [comme les matériaux à outils (acières, carbures), les super-alliages et les alliages réfractaires] est très difficile par coupe, mais peut être réalisé dans de meilleures conditions avec la plupart des procédés non traditionnels, notamment par électro-érosion ou électrochimie.

Tous les matériaux sont aisément usinables par jet abrasif, par faisceau d'électrons et faisceau laser.

À l'inverse, les trois procédés reposant sur le passage de courant électrique (usinage par électroérosion, électrochimique et par torche plasma) usinent facilement tout alliage métallique, mais sont inapplicables à tous les matériaux non métalliques. Mais ces derniers s'usinent bien par ultrason. Enfin, l'usinage chimique est utilisé principalement pour les matériaux métalliques et les verres.

3.2 Débit de matière et puissance nécessaire

La figure 17 représente pour les divers procédés, en échelles logarithmiques, la puissance nécessaire P en fonction du débit de matière D dans les conditions courantes. Dans une telle représentation, les droites de pente unité représentent les conditions d'usinage à effort spécifique :

$$K = P/D = \text{Cte}$$

On note aussitôt deux faits majeurs : les débits de matière des divers procédés sont très variables, puisqu'ils couvrent 6 ordres de grandeur, de $0,1$ à $10^5 \text{ mm}^3/\text{min}$, alors que les efforts spécifiques ne varient que de 3 ordres de grandeur, entre $0,1$ et $100 \text{ W} \cdot \text{min/mm}^3$ (ou ce qui est équivalent entre 6 et 6 000 GPa, si on revient aux unités du paragraphe 2.1). Par effort spécifique croissant, c'est-à-dire par rendement énergétique décroissant, on peut schématiquement classer les procédés en quatre catégories.

Procédés de très bon rendement énergétique

$$K \approx 0,1 \text{ W} \cdot \text{min/mm}^3$$

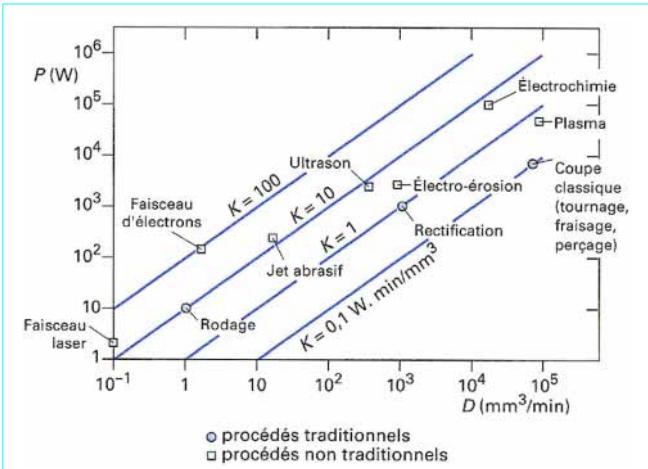


Figure 17 – Corrélation entre débit de matière D et puissance nécessaire P des divers procédés d'usinage [7]

La coupe est le seul procédé de cette catégorie ; comme elle correspond, en outre, aux valeurs maximales de débit de matière, de l'ordre de $10^5 \text{ mm}^3/\text{min}$, on comprend bien l'importance industrielle des procédés de coupe.

Procédés de bon rendement énergétique

$$K \approx 1 \text{ W} \cdot \text{min/mm}^3$$

On trouve à ce niveau la rectification (abrasion à deux corps), l'usinage plasma et, avec un rendement légèrement plus faible, l'usinage par électroérosion. En outre, tous ces procédés produisent des débits de matière élevés, supérieurs à $10^3 \text{ mm}^3/\text{min}$. Ils sont donc tout à fait aptes à réaliser toute opération, y compris des opérations d'ébauche.

Procédés de rendement énergétique faible

$$K \approx 10 \text{ W} \cdot \text{min/mm}^3$$

C'est le rendement de l'usinage par faisceau laser, avec un débit très faible ($0,1 \text{ mm}^3/\text{min}$), des trois procédés d'abrasion à trois corps (rodage, usinage par jet abrasif et par ultrasons) qui produisent des débits de matière croissant de $1 \text{ à } 300 \text{ mm}^3/\text{min}$; pour un débit de matière très élevé, $10^4 \text{ mm}^3/\text{min}$, c'est le rendement de l'usinage électrochimique. Les trois premiers trouveront donc plutôt leur place comme opération de finition. L'usinage par faisceau laser sera utile pour la découpe et le micro-usinage de précision.

■ Procédés de rendement énergétique très faible

$$K \approx 100 \text{ W} \cdot \text{min/mm}^3$$

Cela correspond au cas de l'usinage par faisceau d'électrons qui ne produit, en outre, qu'un faible débit de matière, de l'ordre de $1 \text{ mm}^3/\text{min}$. Ce procédé sera donc utilisé essentiellement dans le micro-usinage de précision.

3.3 Propriétés des pièces usinées

Les opérations réalisables avec les divers procédés sont présentées dans le tableau 2. On peut citer les principales.

■ Perçage

Les usinages par **faisceau laser** et **faisceau d'électrons** permettent de réaliser avec une bonne précision des trous de diamètre inférieur à $125 \mu\text{m}$.

Les usinages par **électrochimie** et **électro-érosion** permettent la réalisation, au moins l'ébauche, de trous profonds, avec un défaut de cylindricité minimal. L'usinage par ultrason permet de réaliser de manière intéressante des trous peu profonds.

■ Découpe intérieure

La réalisation de trous cylindriques intérieurs de section quelconque dans une pièce se fait le plus souvent par découpe le long du contour de la section et chute d'un noyau résiduel.

Les usinages par **électro-érosion** et **ultrason** permettent la découpe précise de petits trous alors que l'usinage électrochimique est mieux adapté à la découpe de grandes parties intérieures.

■ Usinage de cavités

La réalisation de cavités à fond généralement plat peut être effectuée de manière très économique par les usinages **chimique**, **électrochimique** et par **électro-érosion**, notamment lorsqu'il s'agit de cavités profondes, comportant de petits rayons de courbure ou creusées dans des matériaux difficiles à usiner avec les procédés traditionnels.

L'usinage **chimique** est particulièrement performant pour réaliser un creusement de faible profondeur sur une large surface ou sur un grand nombre de petites surfaces avec une grande précision.

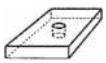
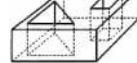
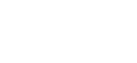
■ Surfaçage

L'usinage électrochimique et l'usinage par électro-érosion, mais ce dernier dans une moindre mesure à cause de son débit de matière inférieur, permettent de réaliser des pièces de forme extérieure complexe.

■ Découpe extérieure

Tous les **procédés non traditionnels**, sauf les usinages par ultrason et par électro-érosion, peuvent découper des pièces de fine épaisseur (inférieure à quelques millimètres) ; la découpe d'épaisseurs plus importantes ne peut être effectuée de manière économique que par électrochimie, torche plasma et oxycoupage (cf. figure 16).

Tableau 2 – Formes de pièces et usinages de finition réalisables par les divers procédés non traditionnels [7]

Usinage	Perçage de trous (longueur L – diamètre D)		Découpe intérieure		Usinage de cavités		Surfaçage		Découpe extérieure		Usinages de finition					
																
	$D < 25 \mu\text{m}$	$25 \mu\text{m} < D < 125 \mu\text{m}$	$L/D < 20$	$L/D > 20$	de précision	standard	superficiel	profond	double contourage	de révolution	fine	forte	rectification	rodage	ébavurage	filetage
par ultrason			A	C	A	A	C	C	C		C		C	B	A	
par jet abrasif			B	C	C	B					A		A		A	
électrochimique			A	A	B	A	A	A	A	B	A	A	B	A	A	C
chimique	B	B			C	B	A	C			A					C
par électro-érosion	B	A	B	A	A	A	A	A	B		C		A		C	A
par faisceau d'électrons	B	A	B	C	C	C					A	B				
par faisceau laser	A	A	B	C	C	C					A	B				
par arc à plasma			B		C	C				C	A	A				C

A = aisément B = possible C = difficile

Tableau 3 – Performances comparées des divers procédés d'usinage

Usinage	par ultrason	par jet abrasif	électro-chimique	chimique	par électro-érosion	par faisceau d'électrons	par faisceau laser	par arc à plasma	par coupe (fraisage) (1)
Débit de matière (mm ³ /min)	300	15	10 ⁴	15	10 ³ à 3 · 10 ³ (2)	1	0,1	10 ⁵	10 ⁵
Tolérance dimensionnelle (µm)	7	50	50	50	15 à 120 (2)	25	25	1 000	50
Arrondi (mm)	0,025	0,1	0,025	1,25	0,025 à 0,12 (2)	0,25	0,25		0,05
Défaut de parallélisme (µm/mm)	5	5	1		1 à 10 (2)	50	50	10	
Rugosité R_a (µm)	0,25 à 0,5	0,15 à 1,5	0,1 à 2,5	0,5 à 2,5	0,25 à 12 2,5 à 40 (2)	0,5 à 2,5	0,5 à 1,2	élevée	0,5 à 5
Profondeur affectée (µm)	25	2,5	5	5	100 à 300 (2)	250	100	500	25

(1) Fraisage d'un acier

(2) Électro-érosion d'ébauchage

Tableau 4 – Aspects économiques des procédés d'usinage [7]

Usinage	par ultrason	par jet abrasif	électro-chimique	chimique	par électro-érosion	par faisceau d'électrons	par faisceau laser	par arc à plasma	par coupe (fraisage)
Machine-outil et infrastructure	B	A	E	C	B	D	C	A	B
Outilage et équipements de fixation	B	B	C	B	D	B	B	B	B
Consommation d'énergie	B	B	C	D (1)	B	B	A	A	B
Rendement de l'enlèvement de matière	D	D	B	C	D	E	E	A	A
Usure outil	C	B	A	A	C	A	A	A	B

A = coûts très faibles B = coûts faibles C = coûts moyens D = coûts élevés E = coûts très élevés

(1) Coût induit par l'utilisation d'acides

■ Usinages de finition

Les usinages électrochimique, par ultrason, jet abrasif et électro-érosion peuvent réaliser dans des conditions intéressantes certaines opérations de finition du type rectification, rodage, ébavurage et filetage. À ce titre, ils se révèlent des auxiliaires précieux des procédés traditionnels.

Les **performances** des divers procédés en terme de tolérance dimensionnelle, d'écart de forme, de rugosité et de profondeur affectée sont données tableau 3. On peut en tirer les principales conclusions suivantes.

■ Deux procédés ont dans l'ensemble des performances supérieures à la coupe classique : l'usinage **électrochimique** et **l'électro-érosion** de finition. Ils permettent en effet d'obtenir rapidement des pièces avec de très faibles défauts de parallélisme, une faible rugosité et de faibles rayons d'arrondi. Il faut noter, en outre, que la tolérance dimensionnelle est très bonne par électro-érosion, mais seulement moyenne par électrochimie ; ce dernier procédé toutefois affecte la pièce sur une profondeur bien inférieure.

■ L'usinage par **ultrason** se révèle un bon procédé de finition ; il permet en effet, avec un débit de matière moyen, d'obtenir de bonnes tolérances dimensionnelles, de faibles rayons d'arrondi, des défauts de parallélisme et une rugosité faible. En outre, la profondeur affectée par l'usinage est assez faible.

■ Les autres procédés ont, dans l'ensemble, des performances comparables ou inférieures à celles des procédés de coupe. En particulier, tous les procédés ayant une action thermique (électro-érosion, faisceau laser et faisceau d'électrons, torche plasma) affectent sur une grande profondeur les propriétés de la pièce. À l'inverse, les usinages par jet abrasif et chimique n'affectent que sur une très faible profondeur les propriétés de la pièce.

3.4 Aspects économiques

Les principaux éléments déterminant le coût de l'opération sont rassemblés dans le tableau 4. Les procédés non traditionnels ont généralement un ou plusieurs handicaps économiques majeurs par rapport à la coupe :

- pour l'électro-érosion, un coût élevé de l'outillage, qu'il faut renouveler régulièrement, et un rendement énergétique moyen ;
- pour l'électrochimie, un coût très élevé de l'équipement permanent (machine-outil et outillage) ;
- les usinages par faisceau laser et faisceau d'électrons nécessitent des machines-outils de prix élevé et ont un mauvais rendement énergétique ;
- l'utilisation des ultrasons et du jet abrasif est surtout pénalisée par le mauvais rendement énergétique de ces procédés.

4. Perspectives

Que peut-on dire de l'évolution prévisible des techniques d'usinage pour la prochaine décennie ? L'usinage conservera et augmentera très certainement son poids économique. Il n'y aura probablement pas de bouleversements majeurs, mais l'amplification des tendances actuelles qui, de toute façon, sont motivées par la course vers une productivité de plus en plus grande :

■ Au niveau des **procédés**, les procédés « **traditionnels** » de coupe et travail par abrasion ont encore de belles perspectives de développement, notamment par l'élargissement du domaine des très grandes vitesses, par l'optimisation de l'élaboration des matériaux à usiner, par l'utilisation de matériaux à outils plus performants et des procédés de déposition de films minces. L'utilisation des très

grandes vitesses a déjà révolutionné le fraisage des alliages d'aluminium et la rectification des aciers. On commence à utiliser avec profit des revêtements en diamant ou en céramiques multicouches stratifiés à l'échelle de quelques nanomètres.

Côté procédés **non traditionnels**, l'usinage par électro-érosion va certainement conserver sa place dominante et son dynamisme, mais l'usinage par électrochimie verra sans doute s'élargir ses applications du fait de ses bonnes performances. Enfin, l'effort important de recherche et développement sur les lasers, stimulé en grande partie par les besoins de l'industrie de l'armement, aura certainement des retombées importantes dans l'usinage et, de manière plus large, les autres applications du laser dans le travail des matériaux : le soudage et le traitement de surface. Déjà le laser est utilisé comme auxiliaire des opérations de coupe, par exemple pour préchauffer des alliages de faible usinabilité.

■ Au niveau des **machines-outils**, leur conception et réalisation va conduire à une réduction des temps morts et du nombre de montages de la pièce nécessaires, une augmentation des vitesses d'avance et de la précision de positionnement. Ces objectifs seront certainement atteints par une série de modifications dont certaines commencent à apparaître ; ainsi, récemment, a été réalisé un système d'asservissement des axes basé sur l'utilisation de moteurs linéaires permettant d'atteindre une vitesse d'avance de 60 m/min avec une précision de positionnement fortement améliorée. Le contrôle métrologique direct de la pièce sur la machine est un autre axe de développement intéressant, car ces informations permettraient, via un ordinateur et un logiciel adapté, de corriger soit en temps réel, soit sur la pièce suivante la commande de la machine et de tenir compte de manière globale des différents phénomènes responsables des dérives dimensionnelles : usure des outils, déformation du système induite par les sollicitations mécaniques et la dérive thermique.

■ Les **opérations** d'usinage seront de plus en plus intégrées dans le processus complet de la fabrication mécanique. Les objectifs sont de rendre ce processus le plus continu possible, de minimiser le nombre de machines-outils nécessaires et de maximiser le nombre d'opérations effectuées sur chaque machine. Il va donc certainement apparaître de plus en plus de machines-outils réalisant en séquence des usinages, traditionnels ou non traditionnels, des mises en forme sans enlèvement de matière, des assemblages, un traitement thermique, voire un traitement de surface.

5. Annexe : évolution de la production de machines-outils pour le travail des matériaux métalliques

La figure 3 (§ 2) donne l'évolution entre 1975 et 1995 de la production et de la consommation de machines-outils des principaux pays occidentaux. Ces machines-outils sont destinées à réaliser la mise en forme des matériaux métalliques soit par usinage, soit par formage, laminage exclu. Les données statistiques de 1996 du CECIMO (Comité européen de coopération des industries de la machine-outil, basé à Bruxelles) permettent d'analyser de manière plus détaillée l'évolution et la nature de la production de machines-outils. Les chiffres du tableau 5 peuvent être considérés comme très significatifs, car ils sont relatifs à la production entre 1989 et 1994 de l'Union Européenne (12 pays) qui, avec 41 % de la production mondiale, est le premier producteur de machines-outils. À titre de comparaison, le Japon et les États-Unis d'Amérique produisent respectivement 22 et 12 % de la production mondiale.

Tableau 5 – Évolution de la production des diverses machines-outils pour la mise en forme des matériaux métalliques dans l'Union Européenne (Statistiques CECIMO 1996)

Type de machine-outil	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Usinages non traditionnels : électro-érosion, laser, électrochimie	4	4	3,6	3,7	4,4	5,8
Centres d'usinage, machines-transfert.....	16,3	18,3	17,7	20	19,8	19,2
Tours	15,4	14,5	13,4	12,4	10,1	10,8
Fraiseuses, perceuses, alésoiseuses	14,2	13,9	11,9	11	9,8	9,4
Machines à rectifier et à polir	11,1	11,1	12	10,8	11,3	11,2
Autres machines d'usinage (brochage, sciage, fabrication d'engrenages...).....	10,4	9,7	9,3	8,8	9	9
Total machines d'usinage (%)	71,4	71,5	67,9	66,7	64,4	65,3
Presses (emboutissage, forgeage, pliage, cisailage, poinçonnage...)	20,6	19,2	21,8	23,4	24,3	23,6
Autres machines de formage (tréfilage, étirage, roulage de filets...).....	8	9,3	10,3	9,9	11,3	11,1
Total machines de formage (%)	28,6	28,5	32,1	33,3	35,6	34,7
Production totale de machines-outils (milliards d'écus)	14,25	15,45	14,85	12,27	9,6	10,22

On note les points suivants :

■ **La production de machines-outils** est soumise à des cycles économiques de fortes amplitudes : ainsi, sur la période considérée, la production totale de la plus mauvaise année, 1993, ne représente que 62 % de la production de l'année record, 1990.

■ **Le formage** voit son activité moins affectée par ces cycles économiques que l'usinage et, en valeur relative, progresse régulièrement au détriment de l'usinage : la part des machines de formage passe de 28,6 % en 1989 à 34,7 % en 1994. Cette progression concerne aussi bien le secteur très important des presses (20,6 à 23,6 %) que le secteur des machines diverses de formage (8 à 11,1 %). Il faut noter que les presses représentent la catégorie la plus importante de machines-outils, mais qu'il s'agit de machines extrêmement diverses (presses verticales ou horizontales, presses mécaniques ou hydrauliques...), cette diversité reflétant la grande variété des procédés concernés : forgeage, filage, travail des métaux en feuilles par emboutissage, pliage, cisailage, etc.

■ **Les machines d'usinage traditionnel** sont majoritaires, mais leur importance décroît d'environ 67 % en 1989 à 60 % en 1994 ; cette décroissance est due principalement à la croissance des machines de formage décrite précédemment et, mais dans une moindre mesure, à celle des machines d'usinage non traditionnelles qui, après une faible décroissance de 4 à 3,6 % entre 1989 et 1991, améliorent dans les dernières années leurs positions (5,8 % en 1994). Ce dernier chiffre montre bien que l'importance des usinages non traditionnels reste faible, mais cette situation évoluera peut-être significativement à l'avenir.

La situation des machines réalisant les divers usinages traditionnels est très variée :

- croissance, puis stabilisation vers 19,5 % des centres d'usinage et machines-transfert qui représentent le secteur majoritaire ;
- stabilité à environ 11 % des machines travaillant par abrasion (rectification, polissage) ;
- décroissance et stabilisation vers 10-11 % des tours ;
- décroissance régulière, mais se ralentissant de 14,2 à 9,4 % des machines spécialisées du type fraiseuses, perceuses... ;
- légère décroissance de 10,4 à 9 % des autres machines d'usinage.

■ Au total, l'évolution sur ces 6 années se révèle importante :

● En 1989, on pouvait répartir les machines-outils en **5 catégories** d'importance très étagée :

- 20 % : les presses ;
- 15 % : les centres d'usinage et machines-transferts, les tours et les fraiseuses, perceuses... ;
- 10 % : les machines à rectifier et à polir, les autres machines d'usinage ;
- 8 % : les autres machines de formage ;
- 4 % : les machines d'usinage non traditionnelles.

● En 1994, se dessine une répartition selon **3 classes** seulement (esquisse d'une répartition selon 2 classes ?) :

- autour de 20 % : les presses, les centres d'usinage et machines-transferts ;
- vers 10 % les tours, les fraiseuses et perceuses..., les machines à rectifier et à polir, les autres machines de formage et d'usinage ;
- vers 6 % les machines d'usinage non traditionnelles.

Cette évolution traduit l'évolution des techniques de mise en forme due à la nécessité d'améliorer la productivité ; on constate l'émergence d'une nouvelle répartition des tâches schématiquement à part égale entre deux types de machines :

- les machines polyvalentes : presses, centres d'usinage et machines-transferts, d'une part ;
- les machines spécialisées de formage et usinage, d'autre part.

L'avenir nous dira si cette répartition est appelée à durer ou si, au contraire, il ne s'agit que d'une étape provisoire. Notons néanmoins que grâce à leurs avantages spécifiques et même si, dans quelques cas, leur importance décroît, aucun secteur de machines-outils n'est voué à disparaître dans un futur proche et que, malgré le caractère cyclique de son activité, l'industrie de la machine-outil conserve toute son importance économique.

Références bibliographiques

- [1] WEILL (R.). – *Techniques d'usinage*. Dunod, 409 p., 227 fig., 12 tabl., 72 réf. (1971).
- [2] TRENT (E.). – *Metal cutting*. Butterworth, 203 p., 141 fig., 12 tabl. (1977).
- [3] KRUSCHOV (H.M.). – *Principles of abrasive wear*. Wear, 28, 69-88 (1974).
- [4] GILOREMINI (P.). – *Contribution à la modélisation de la formation du copeau en usinage des métaux*. Thèse Dr-Ing., École des mines de Paris, 105 p., 52 fig. (1982).
- [5] MILLS (B.) et REDFORD (A.H.). – *Machinability of engineering materials*. Applied Science Publishers, 174 p., 901 fig., 22 tabl. (1983).
- [6] FAIDHERBE (G.), VACOSSIN (B.), CRAPART (J.C.) et TANGUY (J.C.). – *L'environnement des centres d'usinage*, Guide pratique CETIM n° 51, 90 p. (1990).
- [7] SPRINGBORN (R.K.) (Ed.). – *Non traditional machining processes*. American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Dearborn, 178 p., 162 fig., 29 tabl. (1967).
- [8] ASME Handbook t. 14, *Machining*, 9^e édition, 944 p., 1 138 fig., 483 tabl. (1989).
- [9] PRUVOT (F.). – *Conception et calcul des machines-outils*. Vol. 1 *Généralités, Morphologie, Plan général*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 212 p., 75 fig., 7 tabl. (1993).
- [10] GHOSH (A.) et MALLIK (A.K.). – *Manufacturing science*. John Wiley & Sons, New York, 433 p., 356 fig., 22 tabl. (1986).
- [11] SCHULTZ (H.) et MORIWAKI (T.). – *High speed machining*. 42^e CIRP general Assembly, Aix-en-Provence, Key Note Paper, 7 p., 98 réf 23-29 août 1992.
- [12] COGUN (C.). – *Computer-aided preliminary selection of non traditional machining processes*. Int. J. Mach. Tools Manufact., 34, n° 3, 315-326 (1994).
- [13] DOYLE (E.D.) et SAMUELS (L.E.). – *Further developments of a model of grinding*. Proc. Int. Conf. on Production Engineers, Tokyo, 45-50 (1974).
- [14] TEISSON (J.). – *L'usinage d'ultraprécision pour l'optique et la mécanique*, dans *Nanotechnologies et Micromachines*. Observatoire français des techniques avancées, Masson, Paris, 263-276 (1992).
- [15] LUCCA (D.A.) et RHOTER (R.L.). – *Energy dissipation and tool-workpiece contact in ultra precision machining*. Tribology Transactions, 37, 3, 651-655 (1994).
- [16] RABINOWICZ (E.). – Lubr. Eng. vol. 33, 378 (1977).