

Matériaux pour outils de coupe

par François BAGUR

Directeur technique et cogérant de la société TOOL

1. Phénomène de la coupe.....	BM 7 080 - 2
1.1 Interactions pièce/outil/machine d'usinage.....	— 2
1.1.1 Vibrations de coupe.....	— 2
1.1.2 Broutage.....	— 2
1.1.3 Déformation élastique.....	— 2
1.1.4 Cas des matériaux écrouissables.....	— 3
1.1.5 Couple outil/matière.....	— 3
1.2 Conditions d'utilisation d'un outil.....	— 3
2. Matériaux	— 4
2.1 Aciers rapides	— 5
2.1.1 Différentes familles.....	— 5
2.1.2 Traitements de surface (diffusion et revêtements durs)	— 9
2.1.3 Essais en laboratoire sur la capacité de coupe	— 11
2.1.4 Applications	— 11
2.2 Carbures métalliques	— 11
2.2.1 Carbures métalliques sans revêtement	— 11
2.2.2 Carbures métalliques avec revêtement	— 12
2.3 Céramiques	— 12
2.4 Cermets	— 13
2.5 Diamant	— 13
2.5.1 Diamant naturel	— 13
2.5.2 Diamant synthétique	— 13
2.5.3 Mise en œuvre	— 14
2.5.4 Utilisation dans l'usinage	— 14
2.6 Nitrule de bore cubique	— 14
2.6.1 Propriétés	— 14
2.6.2 Mise en œuvre	— 15
2.6.3 Utilisations	— 15
3. Sélection des matériaux et vitesses de coupe.....	— 15
3.1 Matériaux	— 15
3.2 Vitesses	— 15
Pour en savoir plus.....	Doc. BM 7 080

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie.

Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu.

Dans le courant du XX^e siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (acières rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces.

1. Phénomène de la coupe

La théorie de la coupe est exposée dans les articles sur la mécanique, physique (B 7 040) et modélisation (B 7 041) de la coupe des métaux ainsi que l'endommagement des outils (B 7 042) dans le présent traité.

La figure 1 définit les différents termes techniques ainsi que certains symboles se rapportant à l'outil, et qui sont utilisés dans cet article.

Nous allons présenter rapidement les divers phénomènes liés à la **formation du copeau** qui déterminent les **conditions de travail de l'outil** et sa **durée de vie**.

1.1 Interactions pièce/outil/machine d'usinage

1.1.1 Vibrations de coupe

Pour une avance, une profondeur de passe, une vitesse de coupe et un angle de coupe fixés, l'effort de coupe est variable et, grossièrement, périodique ; il impose des vibrations forcées à la pièce, à l'outil, au porte-outil et à son attachement, à la broche et à la machine, auxquelles se superposent les vibrations propres de ces éléments, excitées par les premières. La fréquence de ces vibrations est élevée et leur amplitude (de l'ordre du micromètre dans le travail normal) est d'autant plus faible que la machine est plus rigide. Elles ne sont pas, normalement, visibles à l'œil nu, mais elles affectent l'état de surface de la pièce et, de plus, peuvent influer sur la durée de bonne conservation de l'arête de coupe, d'où l'intérêt d'avoir **un ensemble rigide de l'outil à la machine**.

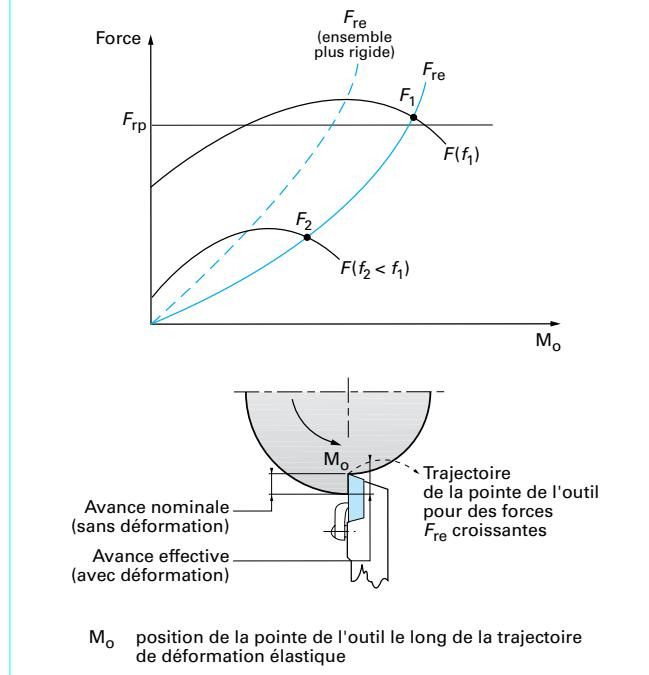
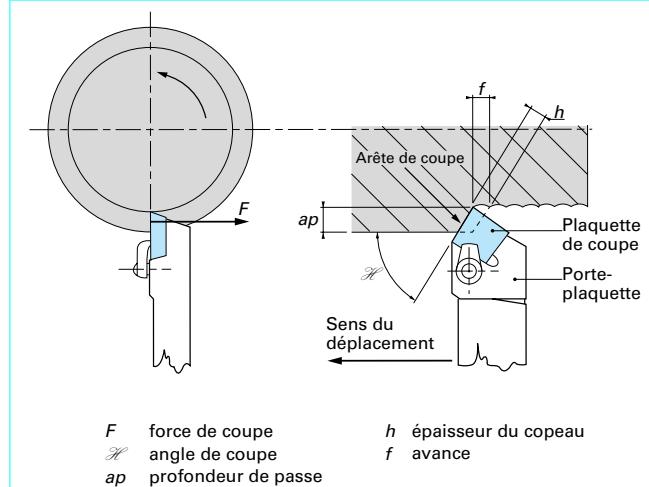
1.1.2 Broutage

Dans certains cas, où la période des efforts de coupe devient égale à une période propre de la pièce ou de la machine, les **vibrations** prennent une ampleur considérable, causant une **fatigue** dangereuse des organes et provoquant des **ondulations** très marquées sur la pièce, ce qui oblige à arrêter l'usinage. C'est le phénomène dit **broutage**. Il peut résulter d'un défaut d'ajustement dans la machine, ou d'un défaut soit de montage (mauvaise fixation, porte-à-faux excessif), soit d'angle de coupe, qu'il suffit de corriger. On peut encore s'en défendre :

- en changeant la période de coupe (modification de la section du copeau ou de la vitesse de coupe) ;
- en changeant la période propre du système par adjonction de supports ou de masses supplémentaires ou par inversion de l'outil ; pour des porte-grains dont le porte-à-faux ne dépasse pas 5 fois le diamètre du corps (par exemple 50 mm pour \varnothing 10 mm), l'alliage haute densité type *Densimet* (Plansee) (93 % W, 4,6 % Fe et 2,4 % Ni, masse volumique 17,5 kg/dm³ et de module d'élasticité $E = 350$ GPa) élimine souvent le broutage ;
- en introduisant un amortissement (surfaces frottantes, outils antivibratoires).

1.1.3 Déformation élastique

Sous l'effort de coupe, la pièce, l'outil et la machine se déforment élastiquement ; de ce fait, il résulte un **déplacement relatif de l'arête de coupe par rapport à la surface de la pièce** (déformation élastique) qui peut :



— soit tendre à faire sortir l'arête de coupe de la matière et à diminuer l'épaisseur du copeau (*dégagement de l'outil*), donc l'effort ; il existe une position d'équilibre. La pièce sera donc plus épaisse que ne le prévoit le réglage de l'outil ;

— soit faire pénétrer l'arête de coupe dans la matière et augmenter l'épaisseur du copeau (*engagement de l'outil*) ; plus précisément, pour un déplacement relatif pièce-outil croissant, la force de réaction élastique de l'ensemble outil/porté-outil/machine F_{re} est constamment croissante mais l'avance correspondante et la force de coupe associée F d'abord croissantes passent par un maximum puis décroissent (figure 2).

L'avance effective se stabilise à la valeur correspondant à la position de la pointe de l'outil telle que la force de coupe est égale à la force de réaction élastique $F = F_{re}$. Deux cas sont possibles :

- si l'avance nominale f_1 est supérieure à un certain seuil, l'avance effective correspond à une force de coupe F_1 supérieure à la force de rupture F_{rp} de l'ensemble outil/porte-outil/machine ; ce cas, exceptionnel, se solde par l'arrêt de l'usinage par rupture de l'élément le plus faible de cet ensemble ;

- pour une avance nominale f_2 plus faible que f_1 , la force de coupe effective F_2 est inférieure à la force de rupture F_{rp} ; selon la position d'équilibre de l'ensemble outil/porte-outil/machine, l'avance effective peut être plus grande ou plus faible que l'avance nominale. L'écart entre l'avance nominale et l'avance effective est d'autant plus faible que l'ensemble outil/porte-outil/machine est plus rigide.

Ce dernier cas permet donc la coupe, mais conduit à des surcharges et parfois à du broutage. On peut alors supprimer ce dernier en adoptant un outil déformable qui rend la trajectoire dégageante, ou encore, si possible, en inversant l'outil et en travaillant à l'envers.

Il y a lieu de noter que, si l'arête de coupe comporte une partie courbe, la trajectoire élastique peut être engageante pour une partie et dégageante pour le reste.

1.1.4 Cas des matériaux écrouissables

Le développement du paragraphe 1.1.3 ne tenait pas compte de la **phase initiale de pénétration de l'outil dans la pièce** durant laquelle l'épaisseur nominale du copeau est augmentée à partir de zéro et passe progressivement par des valeurs inférieures à l'épaisseur minimale ; durant cette phase, du fait de la déformation élastique, l'outil ne forme pas de copeau mais un bourrelet frontal et écrouit la pièce par déformation plastique sur une certaine profondeur (figure 3).

Mais cette phase peut induire un **échauffement considérable de l'arête de coupe** ; elle est d'autant plus longue que la flexibilité de l'ensemble outil/porte-outil/machine et que la capacité d'écrouissage du métal usiné sont plus grandes.

Pour les métaux courants, l'arête pénètre dans la pièce sans subir de dommages appréciables et, si l'avance n'est pas inférieure à l'avance minimale, le copeau se stabilise.

Par contre, pour certains métaux (acières inoxydables, acier au manganèse), l'écrouissabilité est considérable et l'**arête peut être détruite** avant de couper si le matériau de coupe est mal adapté. Dans ce cas, il convient de diminuer la vitesse et d'augmenter les avances, d'utiliser un outil avec une arête plus vive et surtout d'utiliser une machine plus rigide.

1.1.5 Couple outil/matière

L'ensemble des éléments décrits jusqu'ici montre nettement que la notion de **couple outil/matière** (COM) doit être impérativement prise en compte.

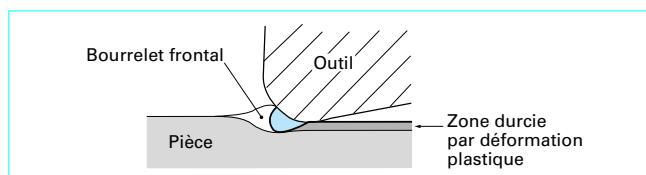


Figure 3 – Phase initiale de pénétration de l'outil dans la pièce

■ Pour qu'un outil fonctionne dans des conditions correctes, il faut que l'**épaisseur de copeau générée** soit comprise dans une certaine gamme.

- La **valeur minimale** est appelée *copeau minimal* et notée h_{min} . Cette épaisseur minimale varie de quelques centimètres (2 à 3) jusqu'à quelques millimètres (de 1,5 à 2) et est influencée principalement par : la finesse de l'arête (valeur de la préparation d'arête différente d'un type d'outil à un autre), de la matière usinée, de la rigidité et de l'orientation de l'arête. Le fait d'usiner à grande vitesse de rotation (supérieure à 14 000 tr · min⁻¹ en général) provoque un décalage de cette épaisseur minimale vers le bas.

Exemple : il est courant de trouver des valeurs inférieures à 5 µm lors du fraisage d'un aluminium.

- La résistance mécanique et thermique de l'arête de coupe, la génération de vibrations par efforts de coupe trop importants impliquent la prise en compte d'une **valeur maximale de l'épaisseur de copeau**.

■ De plus, la **vitesse de coupe** agit directement sur le mode de formation du copeau.

- Le non respect d'une **vitesse de coupe minimale**, notée V_{cmin} entraîne inévitablement la formation d'un *copeau adhérent* (portion du copeau qui se colle sur la face de coupe de l'outil). Ce copeau adhérent provoque une « arête rapportée » sur l'outil générant des vibrations de coupe (§ 1.1.1).

- Le respect d'une durée de vie d'outil *technico-économiquement* viable entraîne la prise en compte d'une **vitesse de coupe maximale** à respecter. La dimension économique est très importante.

Exemple : une durée de vie de 2 min dans un acier réfractaire usiné avec une plaquette de coupe en céramique renforcée (plaquette très chère) est viable technico-économiquement. La même durée de vie dans un acier courant (type 42CrMo4) avec une plaquette de coupe en carbure ne peut pas être considérée comme viable.

En ce qui concerne l'**usinage à grande vitesse**, la notion de couple outil/matière ne suffit plus. Plus exactement, la broche (montée sur le bâti machine) intervient d'une manière si prépondérante pour le bon déroulement de l'usinage que la notion de **triplet outil/matière/ environnement** (TOME) est couramment employée (environnement désigne ici l'environnement du couple outil matière, principalement la broche).

Il apparaît donc que le bon déroulement d'un usinage dépend de plusieurs paramètres (liés à l'outil, la matière usinée, la pièce, la machine...). La prise en compte de tous ces paramètres est indispensable dans la détermination des conditions d'utilisation d'un outil.

1.2 Conditions d'utilisation d'un outil

Dans le but de déterminer les conditions optimales, Taylor [1] le premier et depuis de nombreux expérimentateurs ont cherché à établir les **lois de la coupe**, en particulier la relation entre la durée de vie de l'outil et la vitesse de coupe quand sont stabilisées un certain nombre de variables : dimensions de la section du copeau, matière de la pièce et de l'outil, géométrie de ce dernier. Ils sont parvenus, pour la plupart, à des formules semblables, mais les coefficients de celles-ci présentent une dispersion importante pour plusieurs raisons :

- deux matériaux de même composition chimique et de même dureté peuvent avoir des usinabilités différentes ;
- outils géométriquement différents ;
- essais n'ayant pas porté sur le même champ des variables ci-dessus (en particulier vitesses de coupe) ;

— impossibilité d'éviter des erreurs de mesure dont l'effet cumulatif peut être important ;

— durée de vie de l'outil dépendant d'autres variables méconnues telles que : état de surface des arêtes de coupe, finesse de l'arête, machines-outils elles-mêmes, mode de fixation de l'outil et de la pièce, forme et dimension de cette dernière, section d'outil, refroidissement, etc.

Exemple : ainsi, l'angle de dépouille a été considéré longtemps comme indifférent ; des essais ont montré que dans le tournage de fonte, avec outils en carbure, une variation de quelques degrés de cet angle faisait varier du simple au double le nombre de pièces usinées entre deux affûtages.

Pour que les résultats soient comparables, il faudrait que les essais soient réalisés avec les machines, des outils et des pièces identiques. En effet, la *durée de vie de l'outil dépend de facteurs incontrôlables* : homogénéité du matériau usiné, structure métallurgique de ce matériau et de celui de l'outil. Toutes choses étant égales par ailleurs, ces éléments seraient encore cause de dispersions importantes.

En fait, deux voies sont possibles pour fournir les conditions d'utilisation d'un outil à un usineur.

■ Utilisation de banques de données de points de fonctionnement

Cette démarche est vouée à l'échec pour plusieurs raisons dont les deux principales sont :

— une banque de données n'est le reflet que de situations *puntuales et non généralisables, encore moins extrapolables* ;

— l'utilisation des banques de données se fait principalement par extrapolation linéaire (règle de trois). Prenons un exemple de tournage : un utilisateur souhaite obtenir l'avance possible sur son outil pour une profondeur de passe donnée mais aucune valeur pour cette profondeur de passe n'est stockée. Il recherche alors dans la banque de données des conditions pour des profondeurs voisines. Une extrapolation linéaire est ensuite effectuée pour trouver les conditions à la profondeur souhaitée. Mais, technologiquement, rien ne permet d'affirmer que les conditions ainsi déduites sont viables. Cela est illustré par la courbe de contrôle de copeau d'une plaque de coupe donnée dans une matière donnée de la figure 4 : la profondeur de passe ne varie pas linéairement avec l'avance.

■ Utilisation d'algorithmes

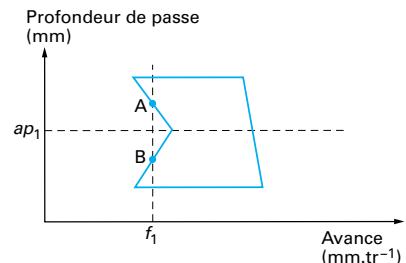
Cette voie est celle développée dans le concept du couple outil/matière, concept normalisé par la norme NF E66-520.

À partir du domaine de fonctionnement de l'outil dans une matière obtenu par essais, on vient superposer de l'algorithmique permettant d'interagir sur le domaine de fonctionnement en fonction des paramètres de l'opération d'usinage, de la machine, du bridage de la pièce... Le domaine d'emploi de l'outil dans la matière n'est pas décrit pas un ou des nuages de points (comme dans le cas des banques de données) mais par un ensemble de paramètres permettant de tracer le contour du domaine d'emploi. Une schématisation de cette méthode est faite figure 5.

Cette démarche présente les principaux avantages suivants :

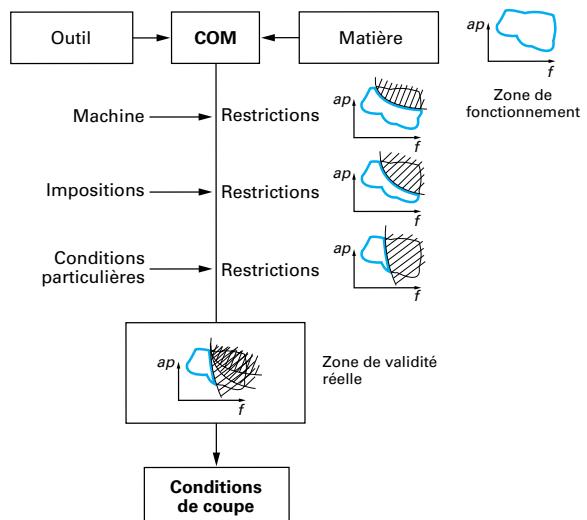
— les paramètres d'utilisation proposés sont corrects (on est certain qu'ils se trouvent à l'intérieur du domaine d'emploi de l'outil dans la matière) et ils prennent en compte toutes les données de l'usinage (capacité machine, qualité de pièce, bridage...) ;

— les données sont comparables. Trop souvent, la comparaison entre deux outils s'effectue par un remplacement poste pour poste de l'outil sur la machine et par une comparaison des durées de vie. Or, *à priori*, rien ne prouve que les paramètres de coupe utilisés avec le premier outil sont autorisés avec le second. La conséquence est que l'on risque de disqualifier un outil plus performant que celui-ci en place, parce que mal testé. Ce travers est évité par cette méthode.



L'avance f_1 , autorisée pour les points A et B, est interdite pour la profondeur de passe ap_1 .

Figure 4 – Courbe de contrôle de copeau



Les **impositions** sont les contraintes extérieures à l'usinage (cahier des charges par exemple).

Les **conditions particulières** sont liées à la forme de la pièce.

Figure 5 – Utilisation du concept de couple outil/matière (COM)

2. Matériaux

Nota : pour bien comprendre ce qui suit, le lecteur pourra se reporter, dans le traité Matériaux métalliques, aux articles : *Essais mécaniques des métaux* (M 120, M 123, M 125, M 126), *Acières à outils* (M 330), et *Propriétés et applications des matériaux non totalement métalliques* (M 868).

Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe. En plus des conditions d'utilisation de l'outil (§ 1.2), celles-ci sont fonction des propriétés du matériau qui constitue l'arête de coupe : ténacité et résistance à l'abrasion.

D'une manière générale, un matériau est d'autant plus tenace que les contraintes, statiques ou dynamiques (chocs), provoquant sa rupture sont plus élevées. Plus précisément, on caractérise cet aspect des matériaux de coupe par leur **ténacité K_{Ic}** , facteur critique d'intensité de contrainte, provoquant la propagation de fissure en mode I (cf. articles *Essais mécaniques des métaux* dans le traité Matériaux métalliques), leur **contrainte de rupture en flexion σ_{rf}** ou leur **résilience** (rupture par chocs) (tableau 1).

Tableau 1 – Propriétés physiques de quelques matériaux de coupe

Propriétés	Masse volumique (kg · m ⁻³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la rupture en flexion (MPa)	Dureté Vickers (HV ₃₀)	Coefficient de dilatation linéique (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Conductivité thermique à 20 °C (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Ténacité K _{Ic} (MPa · √m)
Aciers rapides							
HS 6 – 5 – 2	8 160	217		800 à 920	12,5	19	
HS 2 – 9 – 1 – 8	8 000	217		950 à 1 100	12	19	
Carbures métalliques							
WC + CoK 10	14 800 à 15 000	630 à 650	1 500 à 1 600	1 600 à 1 800	5,5	80	13
WC + TiC + Ta (Nb) C + CoP 10	10 000 à 11 500	530 à 550	1 000 à 1 500	1 500 à 1 700	6	35	10
Céramiques							
AlumineAl ₂ O ₃	3 900	400	400 à 600	2 400	8	25 à 30	4 à 6
Alumine + zirconeAl ₂ O ₃ + Zr O ₂	4 100	365	600 à 800	1 700	9 à 10	15 à 25	5 à 7
Alumine + Whiskers SiCAl ₂ O ₃ + Sic	3 700	390	700 à 900	1 800 à 2 000	7 à 8	35	6 à 9
Alumine + carbure de TiAl ₂ O ₃ + Tic	4 200	410	700 à 900	2 200 à 2 600	8 à 8,5	25 à 30	5 à 7
Nitrule de siliciumSi ₃ N ₄	3 200	310	800 à 1 000	1 500 à 1 600	3	20 à 30	5 à 7
Cermets							
TiCN + Mo ₂ C + WC + VC + TaC + NbC + (Ni,Co)	6 000 à 8 000	390	1 500 à 2 000	1 500 à 1 700	7 à 8	18	
Diamants							
Diamant naturelmonocristal	3 520	1 140	(1)	> 9 000	3,1	600 à 2 000	3 à 4
Diamant synthétiquePCD polycristallin (2)	3 860	920	920	5 000 à 8 000	3,6 à 6	560	8 à 9
Nitrule de bore cubique....CBN polycristallin (2)	3 100	680	570	2 500 à 4 000	5	80 à 120	6

Mesures effectuées à 20 °C sur outil.

(1) Valeur non disponible sur outil de coupe

(2) Pour les matériaux polycristallins, les caractéristiques sont fonction du taux de liant présent dans le compact.

À noter que les contraintes auxquelles sont soumis les outils de coupe ont une double origine : contraintes mécaniques (effort de coupe) et contraintes thermiques (dilatation, évolution des caractéristiques intrinsèques, chocs ou fatigue thermique).

La ténacité et la résistance à l'abrasion sont des qualités contradictoires.

La résistance à l'abrasion est toutefois prépondérante pour le travail à grande vitesse de coupe. Elle dépend de la *composition chimique* du matériau – qui (avec le mode d'arrosage) détermine la valeur du frottement – et surtout de sa *dureté à chaud* (figure 6) qui limite les effets de celui-ci et qui doit être, à la température de coupe, de HRC 50 à 55 pour l'usinage de l'acier.

Plusieurs matériaux conservant cette dureté à des températures de plus en plus élevées (figure 7 a) ont été successivement introduits depuis 1900 (figure 8), permettant chaque fois des vitesses plus grandes et nécessitant des machines-outils plus puissantes et plus rigides.

On emploie donc, pour l'arête de coupe des outils des machines-outils, les matériaux suivants classés en six groupes par ordre de dureté croissante (figure 7 b) : aciers rapides, carbures, céramiques, cermets, diamants et nitrule de bore cubique polycristallin.

Nota : les durées sont exprimées dans les unités les plus courantes pour la famille de matériaux considérée. Pour faciliter les comparaisons, ces différentes durées ont été converties dans l'échelle Vickers, mais il est à noter que ces correspondances ne sont qu'approximatives.

Avant d'aborder les matériaux constituant la partie coupante des outils, rappelons que certains aciers de construction sont souvent utilisés, pour des raisons d'économie, pour réaliser la partie non coupante des outils : queue de forets ou d'alésoirs, corps d'outils, etc. Si cette partie ne subit pas de frottement, elle peut être exécutée en acier mi-dur 2 C 45 (XC 48) non traité ou en acier 38 CrMo 4 traité à une dureté d'environ 300 HB (soit 315 HV ou R ≈ 1 000 MPa). En

revanche, si la partie non coupante est soumise à un frottement, comme par exemple le guide d'un alésoir à plaquettes brasées en contact avec le canon de guidage, le corps de l'outil est réalisé en acier 16 NiCr 6 cémenté-trempé. L'acier 30 CrMo 12 trempé-revenu et nitrué peut être utilisé pour la réalisation de corps de fraises à plaquettes amovibles.

2.1 Aciers rapides

2.1.1 Différentes familles

Le mérite de l'invention des aciers rapides revient aux Américains Taylor et Whites en 1903.

Il est important de souligner que pour chaque nuance d'acier rapide, il existe une limite à la qualification à la matière (par exemple, un outil de fraisage en nuance HS 6-5-2 ne pourra pas user dans des conditions d'usinage industriellement viable un acier de dureté supérieure à 350 HB). Malheureusement, il est très difficile d'établir des règles par défaut car ces valeurs dépendent du type d'outil (foret, fraise, alésoir...) entre autres ; seuls les essais couple outil/matière peuvent mettre en évidence ces limites.

2.1.1.1 Aciers rapides au tungstène

Le tungstène a été le premier élément d'addition principal utilisé. L'acier de base HS 18-0-1 a été longtemps le plus employé.

C'est en 1912 que l'Allemand Becker proposa l'addition de 5 % de cobalt et créa la nuance HS 18-1-1-5. Le rôle du cobalt est de stabiliser les carbures à chaud. La dureté à chaud s'en trouve donc améliorée.

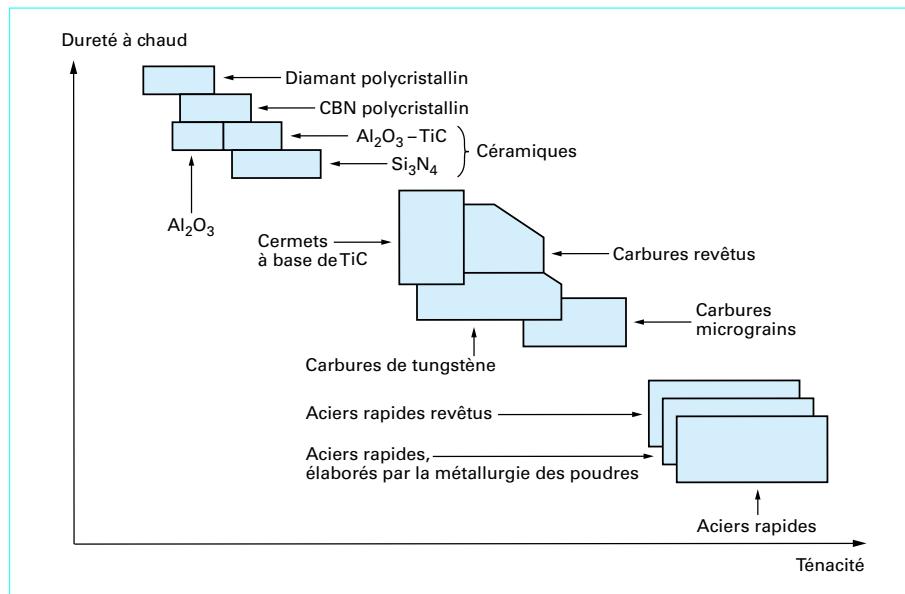


Figure 6 – Comparaison de matériaux de coupe

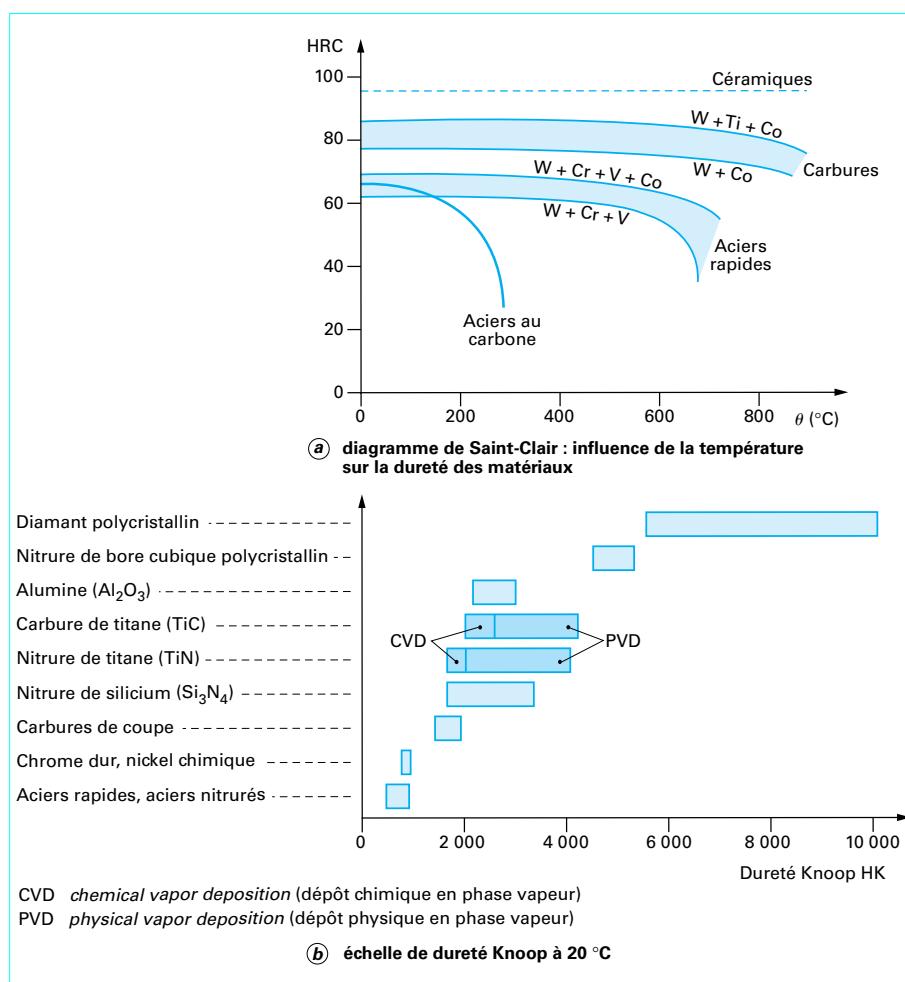


Figure 7 – Dureté des matériaux constituant l’arête de coupe

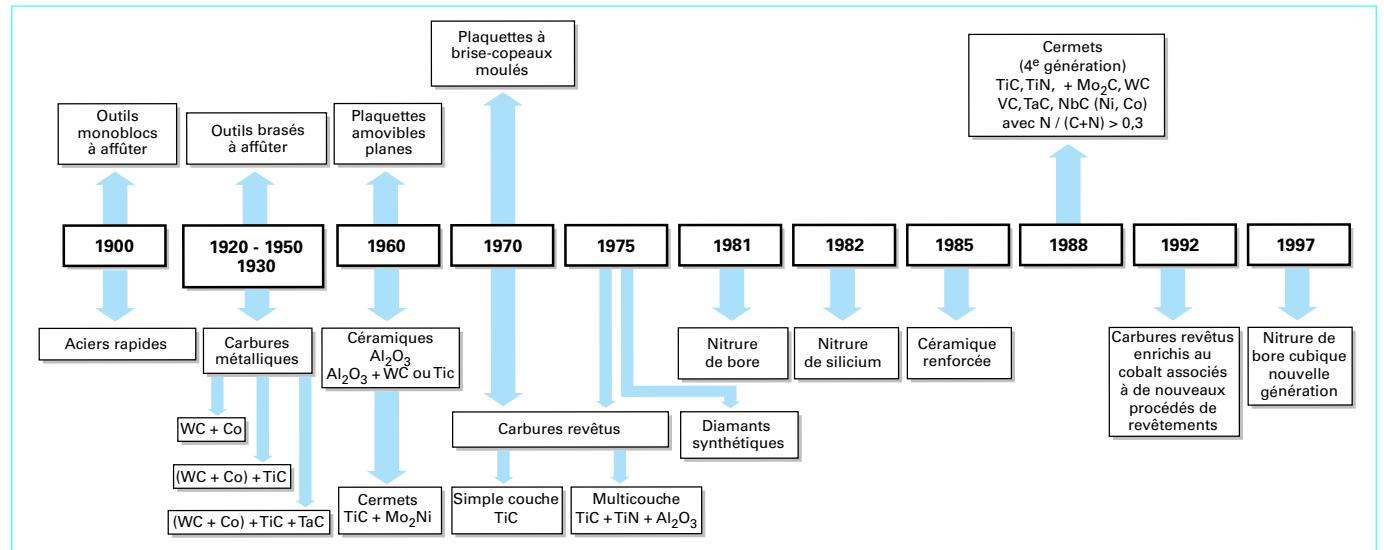


Figure 8 – Dates d'apparition des matériaux de coupe sur le marché européen

rée et par conséquent la capacité à supporter les vitesses de coupe plus élevées.

2.1.1.2 Aciers rapides au molybdène

Bien que découverts vers 1910, les aciers rapides au molybdène n'ont connu leur développement qu'à partir de 1945, en raison de la pénurie de tungstène durant la Seconde Guerre mondiale.

Ce développement tardif est dû au risque de décarburation et de démolybdénisation de ces aciers, tant au cours de leur fabrication qu'au cours des traitements thermiques, ainsi qu'à leur susceptibilité à la surchauffe due à un domaine de température d'austénitisation très étroit.

Alors que les aciers rapides au tungstène peuvent se traiter dans des fours à air, les aciers rapides au molybdène nécessitent des traitements thermiques en bains de sel ou en four sous vide.

Les avantages des aciers rapides au molybdène par rapport à ceux au tungstène sont importants :

- le molybdène est plus abondant dans la nature que le tungstène ;
- le molybdène a une influence double de celle du tungstène sur les capacités de coupe de l'acier : 1 % de molybdène remplace 2 % de tungstène ;
- il est possible d'obtenir des duretés plus élevées avec les aciers au molybdène et, à dureté égale, leur résistance aux chocs est supérieure à celle des aciers au tungstène ;
- le prix de revient des aciers au molybdène est sensiblement inférieur à celui des aciers au tungstène.

La nuance HS 2-9-1-8 est, actuellement, la plus employée des nuances d'aciers rapides à l'exception des outils pour opérations axiales (foret, taraud) pour lesquels la nuance HS 6-5-2 est également très employée.

Nota : les compositions sont données en pourcentage atomique.

2.1.1.3 Aciers rapides surcarburés

Les aciers rapides surcarburés, c'est-à-dire ceux dont la teneur en carbone est supérieure à 1 %, permettent d'obtenir des duretés allant jusqu'à 70 HRC soit environ 1 035 HV (figure 9). La limite de dureté des matériaux usinables a par suite été reculée. C'est ainsi que l'on peut usiner des aciers jusqu'à 52 HRC (soit environ 550 HV).

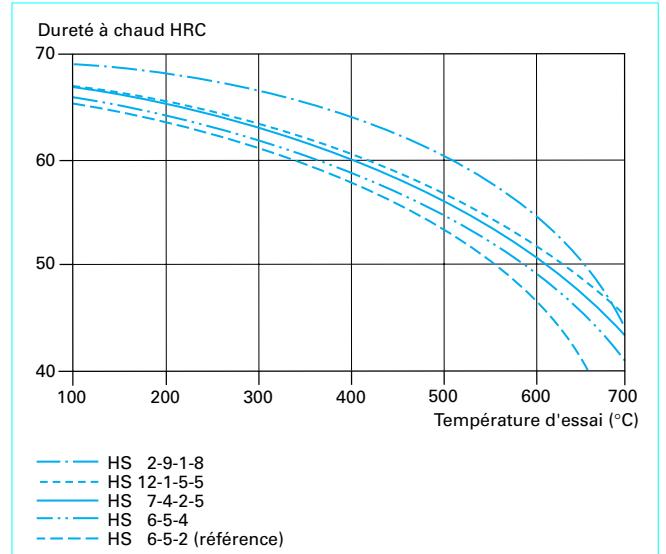


Figure 9 – Dureté de quelques aciers rapides surcarburés en fonction de la température

Parmi les nuances d'aciers rapides surcarburés les plus employées, citons :

HS 6-5-4 ou M4 (AISI)

HS 7-4-2-5 ou M41 (AISI)

HS 2-9-1-8 ou M42 (AISI)

HS 12-1-5-5 ou T15 (AISI)

À noter que les aciers à teneur en vanadium supérieure à 3 % (HS 6-5-4 et HS 12-1-5-5) sont très difficiles à rectifier ou à affûter. Les meules au nitre de bore (type Borazon) se révèlent toutefois efficaces dans ce cas.

Tableau 2 – Composition chimique moyenne des principales nuances d'acières rapides normalisées en France et leurs correspondances avec les désignations américaines AISI

Désignation de la nuance		Composition chimique (%)					
EN 10027-1	AISI	C	Cr	W	Mo	V	Co
Aciers de base							
HS 18-0-1	T1	0,80	4	18		1,1	
HS 6-5-2	M2	0,85	4	6	5	2	
HS 2-8-1	M1	0,85	4	2	8	1,2	
HS 2-9-2	M7	1,00	4	2	9	2	
Aciers surcarburés							
HS 6-5-3	M3 type 2	1,20	4	6	5	3	
HS 6-5-4	M4	1,30	4,5	6	5	4	
Aciers au cobalt							
HS 18-1-1-5	T4	0,80	4	18	0,8	1,3	5
HS 18-0-2-10	T5	0,80	4	18		1,5	10
HS 6-5-2-5	M35	0,85	4	6	5	2	5
Aciers au cobalt à haute teneur en carbone							
HS 7-4-2-5	M41	1,10	4	7	4	2	5
HS 2-9-1-8	M42	1,10	4	1,6	9	1,1	8
Aciers surcarburés au cobalt							
HS 12-1-5-5	T15	1,60	4,5	12	0,8	5	5
HS 10-4-3-10	-	1,30	4	9,5	3,6	3,2	10
HS 7-6-3-12	M44	1,30	4	7	6	3,2	12

Le tableau 2 fournit les compositions chimiques moyennes des principales nuances d'acières rapides normalisées en France.

Le tableau 3 compare les propriétés d'emploi des nuances d'acières rapides les plus courantes. Avec l'aide du tableau 2, on observe l'influence sur les propriétés de l'acier des divers éléments d'alliage, notamment du cobalt et du vanadium.

Tableau 3 – Comparaison des caractéristiques d'emploi des nuances les plus courantes d'acières rapides (en unités arbitraires)

Désignation de la nuance (EN 10027-1)	Résistance à l'usure	Ténacité	Dureté à chaud	Aptitude au meulage
HS 6-5-2	5	7	4	8
HS 6-5-4	8	5	7	2
HS 6-5-2-5	5	5	7	6
HS 2-9-1-8	8,5	5	9	5,5
HS 18-0-1	4	6,5	4	8
HS 18-1-1-5	5	4	7	6
HS 12-1-5-5	9	2,5	8	1

La caractéristique considérée est notée de 1 (médiocre) à 10 (excellente).

2.1.1.4 Aciers rapides resulfurés

Alors que le soufre résiduel est considéré comme une impureté et maintenu à des teneurs inférieures à 0,03 % dans les aciers de base, il peut parfois être ajouté dans certaines nuances d'acières rapides pour en améliorer l'aptitude à l'usinage et au meulage. Il s'agit en général d'une addition comprise entre 0,10 et 0,20 %. Cette resulfuration permet d'améliorer considérablement l'état de surface après usinage des outils. En revanche, la ténacité s'en trouve défavorablement affectée, surtout dans le sens transversal au fibrage.

Les aciers rapides resulfurés sont utilisés pour la fabrication d'outils à profil constant, pour lesquels un bon état de surface est exigé sans rectification (molettes de tournage, fraises mères à denture non rectifiée, fraises pour entrée de denture, etc.).

2.1.1.5 Aciers rapides élaborés par métallurgie des poudres

Cette technique permet d'obtenir des compositions chimiques et des finesse de structure non réalisables par les méthodes d'élaboration conventionnelles.

Ce type d'acier rapide est actuellement largement développé. Certaines nuances surcarburées fortement alliées en cobalt et en vanadium comblient le domaine d'application qui sépare les aciers rapides conventionnels des carbures de coupe.

Par rapport aux nuances conventionnelles, les aciers rapides élaborés par la métallurgie des poudres présentent les avantages suivants :

- moindre déformation au cours du traitement thermique en raison de l'absence totale de ségrégation ;
- très bonne aptitude à la rectification grâce à la finesse de la structure, notamment des carbures ;
- grande résistance à l'usure et haute dureté à chaud par la possibilité de réaliser des nuances à haute teneur en vanadium et en cobalt impossibles à élaborer ou à transformer par les procédés conventionnels ;
- très bonne ténacité et bonne isotropie, même pour des produits de forte section, grâce à la finesse et à l'homogénéité de la structure.

Le tableau 4 mentionne les compositions chimiques moyennes des principales nuances d'acières rapides élaborées par la métallurgie des poudres actuellement disponibles. Ces nuances sont désignées par leurs appellations commerciales car, à ce jour, elles ne font l'objet d'aucune norme particulière.

2.1.2 Traitements de surface (diffusion et revêtements durs)

Nota : le lecteur pourra se reporter utilement à l'article *Traitements thermiques des aciers à outils* (M 1 137) dans le traité Matériaux métalliques.

Différents types de traitement des surfaces sont applicables aux outils en aciers rapides. Ces traitements consistent généralement à accroître la dureté superficielle de l'outil soit par diffusion d'un élément durcissant l'acier, soit par dépôt d'un matériau dur. Ils se pratiquent toujours sur des outils entièrement finis d'usinage.

Le but des traitements de surface est d'améliorer les performances des outils et donc d'abaisser le prix de revient des pièces usinées :

- soit par une meilleure tenue de l'outil permettant de réaliser davantage de pièces entre affûtages ;
- soit par un accroissement de la productivité en augmentant les conditions de coupe (avance, vitesse) tout en conservant une même tenue d'outil ;
- soit en diminuant l'usure, ce qui, à nombre de pièces usinées égal, permet un plus grand nombre de raffûtages en réduisant la quantité de matière enlevée à chaque affûtage.

Nous citerons ici trois des traitements de surface qui représentent 95 % des applications industrielles.

2.1.2.1 Nitruration

C'est un traitement thermo-chimique de diffusion consistant à enrichir superficiellement l'acier en azote. L'azote diffuse dans l'acier et forme, avec les éléments d'alliage, des nitrures très fins qui produisent un durcissement structural. La dureté de base des aciers rapides, généralement de l'ordre de 800 à 900 HV, s'accroît alors superficiellement pour atteindre des valeurs supérieures à 1 200 HV.

Les propriétés des couches nitrurées dépendent dans une large mesure de leur épaisseur et, pour conserver une ténacité convenable aux outils en aciers rapides, il ne faut pas que la profondeur durecie excède 50 µm.

Les deux principaux procédés de nitruration appliqués aux outils en aciers rapides sont la nitruration en bain de sels et la nitruration ionique.

■ Nitruration en bain de sels (parfois appelée cyanuration)

Ce procédé consiste à plonger les outils à nitrurer dans un bain à base de cyanures alcalins fondus à la température de 560 °C. Ce traitement provoque la formation d'une couche externe de combinaison de quelques micromètres d'épaisseur, riche en nitrures et en carbonitrides, et d'une couche sous-jacente de diffusion d'azote. La couche formée possède une *excellente résistance à l'usure, au collage de copeaux et au grippage*.

Des procédés brevetés, dérivés du principe général mentionné ci-dessus, ont pour appellation commerciale : *Tenifer* ou *TF1* (Leybold Durferrit), *Sulfinuz* ou *Sursulf* (Hydromécanique Et Frottement), etc.

■ Nitruration ionique

Ce procédé consiste à développer autour des pièces à traiter un plasma contenant des ions d'azote actifs qui viennent bombarder la surface des pièces. Ce bombardement se traduit pas un double effet :

- chauffage des pièces par dissipation de l'énergie cinétique des ions en énergie calorifique ;
- *implantation* d'ions dans l'acier, fournissant l'azote nécessaire à la formation des nitrures métalliques.

Tableau 4 – Composition chimique moyenne des principales nuances d'acières rapides élaborées par la métallurgie des poudres commercialisées en France

Appellation commerciale (1)	Désignation type EN 10027-1	Composition chimique (%)					
		C	Cr	W	Mo	V	Co
ASP 23 (2)	HS 6-5-3	1,30	4	6	5	3	
ASP 30 (2)	HS 6-5-3-9	1,30	4	6	5	3	9
ASP 60 (2)	HS 7-7-7-11	2,30	4	6,5	7	6,5	10,5
CPM REX M4	HS 6-5-4	1,35	4,2	6	4,5	4	
CPM REX T15	HS 12-1-5-5	1,55	4	12		5	5
CPM REX 76	HS 10-5-3-9	1,50	3,7	10	5,2	3,1	9
S 390	HS 11-2-5-8	1,60	4,7	11	2	5	8
S 690	HS 6-5-4	1,35	4	6	4,5	4	

(1) En l'absence de norme particulière, ces nuances d'acières rapides élaborées par la métallurgie des poudres sont généralement désignées par leurs appellations commerciales.

Les fournisseurs respectifs de ces nuances sont :

- pour les ASP : société des Aciers de Champagnole ;
- pour les S 390 et S 690 : société Aciers Spéciaux Böhler ;
- pour les CPM REX : société Zapp.

(2) Il est à noter que les nuances ASP 23, ASP 30 et ASP 60 sont en cours de remplacement par les nuances ASP 2023, ASP 2030 et ASP 2060 (amélioration des propriétés mécaniques de l'acier rapide).

Les avantages de la nitruration ionique par rapport à la nitruration en bain de sels, pour le traitement d'outils coupants en aciers rapides, résident surtout dans la possibilité de traiter des outils de très grandes dimensions (certaines installations de nitruration ionique permettent de traiter des pièces jusqu'à 6 m de longueur), et de conserver l'état de surface initial des outils, même les plus fins (poli spéculaire par exemple).

Par ailleurs, il est possible, par le procédé de nitruration ionique, d'éviter la formation de la couche de combinaison fragile en surface.

2.1.2.2 Steam Homo

C'est un traitement d'oxydation superficielle dans la vapeur d'eau surchauffée. Pour les outils en aciers rapides, ce traitement se pratique à une température d'environ 560 °C. À cette température, il se forme à la surface de l'acier, par réaction avec la vapeur d'eau, une couche adhérente d'oxyde de fer magnétique (Fe_3O_4) d'environ 2 µm d'épaisseur, conférant une couleur bleu noir aux outils.

Ce film d'oxyde Fe_3O_4 peut améliorer la tenue des outils par deux effets :

- les microporosités de la couche d'oxyde qui produisent une *rétention de liquide de coupe*,
- la nature particulière de cet oxyde qui favorise le glissement du copeau et évite son adhérence sur l'outil.

Le traitement *Steam Homo* peut aussi se pratiquer sur des outils nitrurés. Il produit dans ce cas, outre ses caractéristiques propres décrites ci-dessus, une diffusion complémentaire de la nitruration.

2.1.2.3 Revêtements durs

Vers 1980 se développent les techniques de dépôt ionique permettant de déposer des couches dures de 2 000 à 4 000 HV telles que le nitride de titane (TiN) ou le carbure de titane (TiC). Depuis, les méthodes de déposition de ces couches dures ont évolué ainsi que la nature des dépôts.

Il existe trois types majeurs de dépositions.

■ Procédé CVD (chemical vapor deposition)

Ce procédé, peu onéreux, s'effectue à haute température (de 950 à 1 050 °C). On réalise la déposition sur un substrat de molécules présentes dans un gaz mis dans une enceinte chauffée (figure 10). Une grande variété de revêtements est déposable, avec un bon accrochage sur le substrat. Compte tenu des températures élevées, tous les outils ne peuvent pas être revêtus par procédé CVD. Par exemple, il est impossible de mettre des outils en acier rapide dans un four de dépôt CVD. Ce procédé génère des couches épaisses, de l'ordre de 4 à 8 µm d'épaisseur.

■ Procédé PVD (physical vapor deposition)

Ce procédé, deux à trois fois plus cher que le CVD, s'effectue à basse température (de 200 à 400 °C). Des molécules présentées dans un plasma vont se déposer électrostatiquement sur un substrat (figure 11). Ce procédé permet l'obtention de couches minces, de l'ordre de 1 à 2 µm d'épaisseur. Le revêtement des carbures et des aciers rapides est possible (basse température).

■ Procédé MTVD (medium temperature vapor deposition)

Afin de réunir les avantages des deux techniques précédentes, on les a combinées pour créer le procédé MTVD. Par exemple, le cycle de revêtement d'une plaque de coupe en carbure se déroule de la façon suivante : la surface de la plaque est d'abord enrichie en cobalt, puis on réalise un dépôt de carbonitrure de titane (TiCN) par CVD suivi d'un dépôt de nitride de titane (TiN) par PVD. Ce procédé permet notamment d'augmenter la ténacité des plaquettes en carbure.

D'autres types de revêtements, tels l'alumine (Al_2O_3), peuvent également être déposés.

Le tableau 5 donne, pour les principaux revêtements utilisés aujourd'hui, les duretés et épaisseurs de couches possibles.

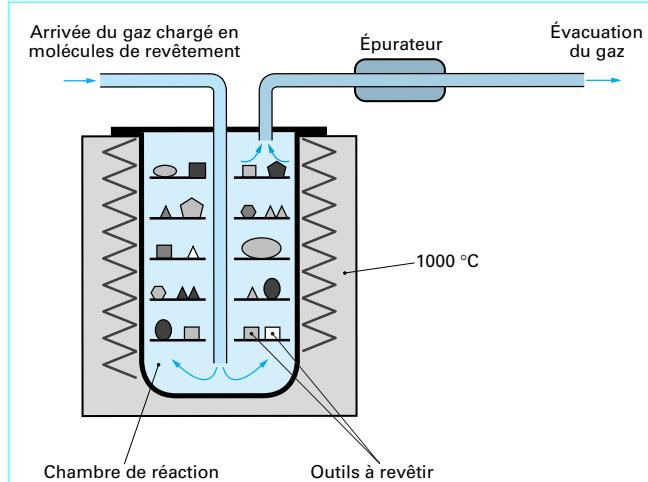


Figure 10 – Procédé CVD

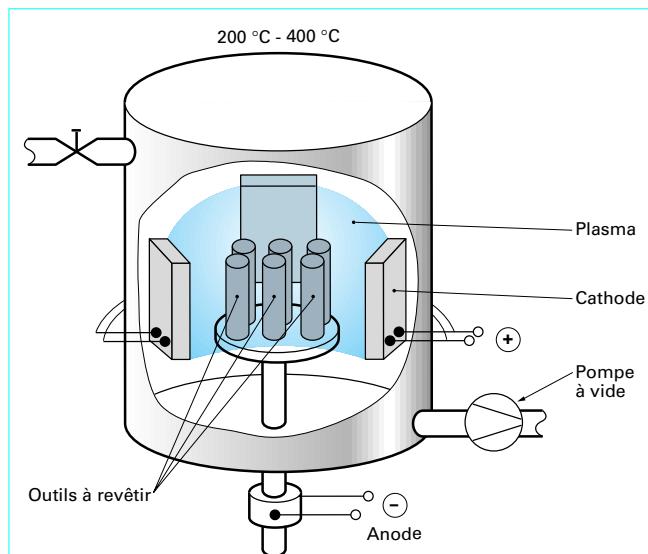


Figure 11 – Procédé PVD

De nouveaux revêtements sont en plein développement (par exemple MoS_2 , connu sous le nom commercial de Movic, Ti₂N, Ti₂CN).

Tous les types d'outils sont susceptibles de voir leurs performances améliorées par un revêtement. La nature du revêtement sera choisie en fonction de l'application (perçage, fraisage, tournage...) et de la matière usinée. La démarche COM a mis en évidence qu'il n'y avait pas de règles préétablies pour le choix d'un revêtement. Seuls les essais permettent de vérifier l'adéquation du revêtement à l'application. De plus, la comparaison des performances entre un outil non revêtu et un outil revêtu ne doit être réalisée qu'après vérification que les paramètres sont équivalents, donc comparables.

Exemple : la figure 12 montre une telle comparaison, qui a pu être menée après s'être assuré que le point $V_c = 25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ et $f = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{tr}^{-1}$ était autorisé pour tous les produits testés.

Tableau 5 – Dureté et épaisseur des principaux dépôts (1)

	Dépôts	Dureté HV	Épaisseur (μm)
CVD	TiN	2 000 à 5 000	3
	TiC	3 000 à 3 500	2 à 3
	Ti(C,N)	2 500 à 3 100	3
	Al ₂ O ₃	2 500 à 3 100	3
	CBN	3 000 à 4 000	3
	Diamant	7 000 à 10 000	5 à 10
PVD	TiN	2 000 à 2 500	3 à 5
	Ti(C,N)	3 000 à 3 400	3 à 5
	(Ti,Al)N	2 000 à 2 400	3 à 5
	CrC	1 850	3
	CrN	1 750 à 2 900	3

(1) Le procédé MTVD est encore trop récent pour fournir de telles données numériques.

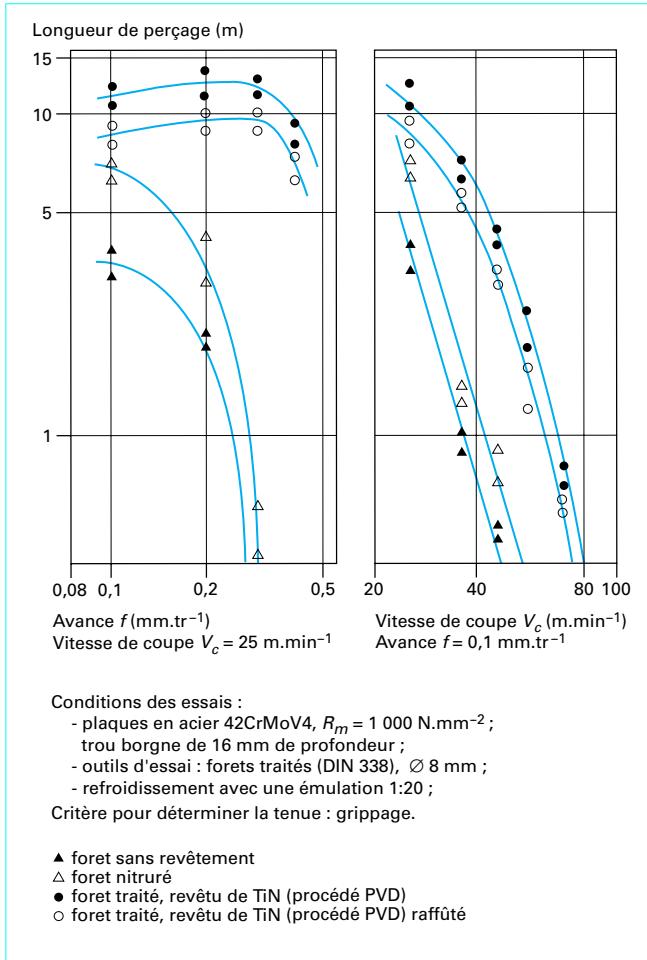


Figure 12 – Exemple de l'influence du revêtement sur la tenue d'un foret

2.1.3 Essais en laboratoire sur la capacité de coupe

Mathon [2] a comparé la capacité de coupe de huit aciers rapides suivant la **méthode par dressage accéléré** qu'il avait imaginée pour déterminer l'usinabilité des aciers de construction (NF A 03-654).

Cet essai Mathon est aujourd'hui beaucoup trop restrictif par rapport aux applications industrielles des outils. De plus, et cela est très dangereux, les paramètres de coupe étant figés, rien ne garantit qu'ils soient autorisés pour l'outil testé. La seule méthode fiable de comparaison de performances des aciers rapides est la **méthode couple outil/matière**. Comme expliqué au paragraphe 1.2, une comparaison ne sera efficace que si elle est réalisée avec des données comparables. Par exemple, un des paramètres du COM est V_{cmin} , c'est-à-dire la vitesse de coupe ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$) en dessous de laquelle il ne faut pas descendre sous peine d'un mauvais fonctionnement de l'outil. L'expérience montre que ce V_{cmin} dépend, entre autres, du couple nuance de coupe-matière usinée. Ce qui veut dire que deux nuances d'acier rapide n'auront pas le même V_{cmin} dans la même matière usinée. La comparaison de ces deux nuances ne pourra donc s'effectuer qu'aux vitesses de coupe supérieures à la plus grande des deux vitesses minimale de coupe.

Il est donc impératif, avant d'effectuer des essais comparatifs de deux nuances d'acier rapide, de s'assurer que les comparaisons seront réalisées dans des zones communes à l'emploi des deux nuances.

Nota : il en sera de même pour toutes les nuances de coupe autres que les aciers rapides.

2.1.4 Applications

Aussi bien en **fraisage** que pour les **opérations axiales** (foret, taraud, alésoir), les aciers rapides représentent encore l'essentiel des ventes. Mais on constate depuis 1997 environ une augmentation de l'utilisation de carbure métallique monobloc (§ 2.2). Cependant, certains outils en acier rapide ne peuvent pas être remplacés pour l'instant, tels que les forets série extralongue ou les fraises à hauteur de coupe très importante (séries longue, extralongue et au-dessus), utilisées dans l'aéronautique par exemple.

2.2 Carbures métalliques

Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en acier ordinaire, la partie active de ces outils étant raffûtée au fur et à mesure de son usure.

Vers 1958 ont été créés les **outils à plaquettes amovibles** (figure 13). Ce type d'outil a été rapidement adopté car les avantages des plaquettes amovibles sont nombreux :

- suppression de l'affûtage ;
- absence de brasure, donc une nuance plus dure peut souvent être utilisée (risque de criqué éliminé) ;
- conditions de coupe plus sévères ;
- indexage (repérage mécanique) de la plaquette pour remplacer une arête usée ou un changement de nuance plus rapide que le changement d'un outil brasé ;
- affûtage d'arête recommandé dans le tournage de l'acier, exécuté d'une façon automatique par le fabricant de plaquettes alors que, pour l'outil brasé, il est réalisé à la main par l'opérateur.

2.2.1 Carbures métalliques sans revêtement

La **dureté des carbures métalliques** (environ 1 500 à 2 500 HV), très supérieure à celle des aciers rapides non surcarburés (HRC 66 soit environ 865 HV), jointe à une **résistance importante** (résistance

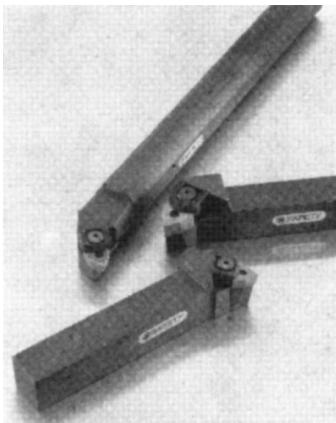


Figure 13 – Outils à plaque amovible (document Safety)

à la flexion de 800 à 2 200 MPa) (tableau 1) explique qu'ils sont les plus utilisés. Leur dureté à chaud permet l'usinage jusqu'à une température de 1 000 °C.

La symbolisation des carbures a fait l'objet de la recommandation NF E 66-304 (ISO 513), les nuances y sont divisées en trois grandes catégories :

P : métaux ferreux à copeaux longs ;

M : métaux ferreux à copeaux longs, à copeaux courts et métaux non ferreux ;

K : métaux ferreux à copeaux courts, métaux non ferreux et matières non métalliques.

Dans chaque catégorie, un nombre allant de 01 à 50 indique la ténacité croissante et la diminution de la résistance à l'usure.

Les nuances modernes de carbures étant de plus en plus polyvalentes et performantes, il devient difficile de les classer ainsi. Cela implique des difficultés croissantes pour établir des équivalences directes entre fabricants. La notion COM est là encore indispensable pour classer et comparer les performances des différents carbures.

Il est important de noter que l'emploi de nuances de carbures non revêtus a quasiment disparu pour certaines technologies telle que les plaquettes amovibles de tournage.

Par contre, les carbures métalliques non revêtus sont de plus en plus employés pour certains types d'outils en remplacement de l'acier rapide. On peut citer : foret en carbure monobloc, foret à insert rapporté en carbure, alésoir à plaquettes, alésoir monobloc, taraud, insert brasé pour les outils de décolletage...

2.2.2 Carbures métalliques avec revêtement

À partir de 1969 apparaît un nouveau type de matériau de coupe : le **carbure revêtu constitué par une plaquette en carbure métallique** recouvert par un film mince (3 à 10 µm) d'un matériau plus dur (2 000 à 3 000 Knoop).

Les couches les plus usuelles sont le **carbure de titane**, le **nitrure de titane**, le **carbonitrure de titane** et l'**alumine** (tableau 6). Chacune de ces couches apporte à l'outil une amélioration dans un domaine particulier (résistance à l'usure, à l'oxydation, au frottement, etc.). Aussi des dépôts multicouches ont-ils été réalisés afin de combiner leurs différents avantages. Des revêtements à base de **nitrure de hafnium** et de **carbure de chrome** ont été également commercialisés.

Tableau 6 – Comparaison des propriétés de certains revêtements

Matériau de revêtement	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	*****	*	*	***
TiN	***	***	***	*****
Ti (C,N)	**	**	**	****
Al ₂ O ₃	****	*****	*****	**
HfN	***	****	****	****

• indique la valeur la plus faible et ***** indique la valeur la plus forte.

Tableau 7 – Céramiques utilisées pour les outils de coupe

Céramiques oxydées	Céramiques mixtes		Céramiques non oxydées
Céramiques blanches	Céramiques mixtes noires	Céramiques renforcées vertes (<i>whiskers</i>)	Sialons gris
Au début : Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ -TiC (30 %)		base Si ₃ N ₄
Actuellement : Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	Al ₂ O ₃ -TiN-TiC	Al ₂ O ₃ -fibres SiC	Al ₂ O ₃ -WC, TaC



Ces couches sont obtenues généralement par CVD (§ 2.1.2.3) dans des fours entre 800 et 1 100 °C, ce qui permet d'obtenir des dépôts de très bonne adhérence.

Pour certaines applications comme le fraisage, ces dépôts sont parfois réalisés à basse température par PVD (§ 2.1.2.3) afin de fragiliser le moins possible le substrat carbure.

Les nouvelles générations de plaquettes amovibles en carbure revêtu sont généralement très complexes. Le substrat est dit enrichi au cobalt, ce qui signifie que le taux de cobalt est différent au cœur et en périphérie de la plaquette. Cela permet d'améliorer la résistance à l'usure d'où une meilleure résistance aux fortes vitesses de coupe tout en conservant une ténacité acceptable. Ensuite, le substrat est revêtu. Le nombre de couches varie d'un fabricant à l'autre. Il peut aller de deux à dix en moyenne, généralement réalisées par procédé CVD ou MTVD. Contrairement aux premiers carbures, il est maintenant impossible de dissocier le substrat du revêtement. Les substrats sont en effet conçus pour recevoir certains types de revêtements, ou au contraire, pour être non revêtus.

2.3 Céramiques

Les céramiques (figure 14) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Ils sont très durs et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe sont réunies dans le tableau 7.

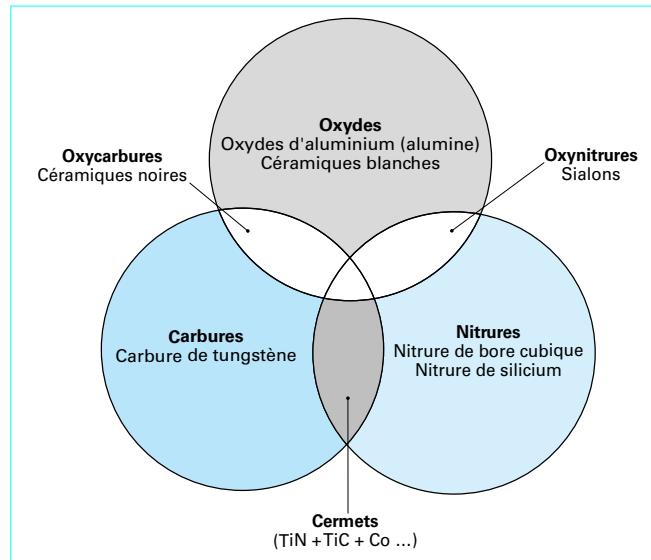


Figure 14 – Céramiques

La céramique la plus courante est l'**oxyde d'aluminium** ou alumine Al_2O_3 . L'apparition de ce matériau sur le marché remonte aux années 1960. Dès l'origine, il s'est révélé intéressant pour la finition des fontes, à condition de disposer de machines robustes et à grandes vitesses.

Le tableau 1 et le diagramme de la figure 6 donnent quelques propriétés physiques de ce matériau et leur comparaison avec celles des aciers rapides et des carbures métalliques.

Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à HRC 60 (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation.

D'autres céramiques sont également employées.

Les céramiques noires sont des mélanges de Al_2O_3 et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircone (ZrO_2). Elles sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al_2O_3 aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe.

Le nitrate de silicium Si_3N_4 permet dans certains matériaux des vitesses de coupe une fois et demie à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides...). Il s'emploie à sec.

Les céramiques renforcées par des whiskers (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leur confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires.

Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes. Un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe).

Les outils en céramique peuvent être revêtus. Le revêtement le plus utilisé est le nitrate de titane TiN.

Nota : des forets monoblocs en céramique (nitrate de silicium) sont arrivés sur le marché qui donnent d'excellents résultats dans la fonte.

2.4 Cermets

Cermet est un terme formé de deux syllabes : *cer* vient de céramique et *met* de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallur-

gie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrides) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, TiCN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co (tableau 1).

Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des *proportions des différents composants* cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN et TiCN et du rapport N/(C + N) qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. Le tableau 8 montre l'influence du rapport N/(C + N) sur les propriétés des cermets.

La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques.

Les cermets présentent en outre **une grande inertie chimique** réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées.

Les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige.

2.5 Diamant

2.5.1 Diamant naturel

Le diamant naturel est issu de la transformation, il y a 100 millions d'années, du carbone sous très haute pression (environ 7 GPa) et à température élevée (environ 2 000 °C). Sa haute dureté et sa faible réactivité chimique expliquent qu'il ait pu se conserver à travers les siècles. On le trouve dans des zones géographiques : Afrique du Sud, Zaïre, Russie, Brésil, Australie, etc. Les plus beaux diamants (les plus grands et exempts de défauts) sont destinés à la joaillerie. En 1977, la production mondiale a été de 8 t dont 26 % pour la joaillerie, le reste étant destiné à l'industrie.

Les **propriétés** remarquables du diamant naturel en tant qu'outil de coupe (tableau 1) sont les suivantes :

— c'est le plus *dur* des matériaux connus ;

— sa *résistance à la compression* est très supérieure à celles des autres matériaux :

— son *coefficient de dilatation thermique* ($3,1 \times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$), plus faible que celui des autres matériaux d'outils, lui confère une excellente résistance aux chocs thermiques ;

— sa *conductivité thermique*, la plus élevée de tous les matériaux 600 à 2 000 W · m⁻¹ · K⁻¹ facilite l'évacuation de la chaleur de la zone de coupe si bien qu'un diamant qui vient d'usiner paraît froid au toucher.

Par contre, sa *résilience* est faible, ce qui le rend très sensible aux chocs mécaniques. Sa *haute dureté*, liée à sa structure atomique particulière, n'est pas la même dans tous les plans. Il se clive suivant quatre directions, ce qui le rend *fragile*.

2.5.2 Diamant synthétique

Les premiers furent réalisés en Suède en 1953 par von Platen, puis en 1954 par Hall aux États-Unis, en soumettant du graphite à des températures et pressions très élevées. Les cristaux obtenus étaient petits (< 0,5 mm) et servaient à la fabrication de meules en diamant synthétique.

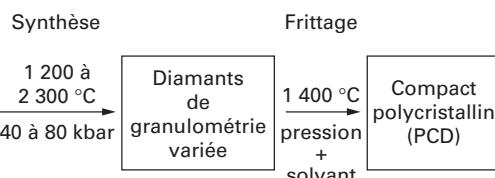
Tableau 8 – Comparaison des propriétés physiques et du ratio N/(C + N) des cermets et des carbures de coupe [3]

Propriétés		Teneur en azote N/(C + N)	Conductivité thermique à 20 °C (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Résistance à la flexion (MPa)	Coefficient de dilatation (10 ⁻⁶ · K ⁻¹)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance relative aux chocs thermiques
Cermets	2 ^e génération	0	8	1 500	7,0	390	0,4
	3 ^e génération	0,22	11	1 650	7,2	400	0,6
	4 ^e génération	0,44	18	2 000	7,4	390	1,2
Carbures	P 10		35	1 500	6,0	550	1,2
	M 10		39	2 000	4,7	600	2,8

La production est actuellement forte : de 22 t/an en 1986, elle a peu évolué jusqu'en 1995, date à laquelle la production semble s'être accélérée.

Pour obtenir des cristaux plus grands, les durées de production sont excessives (> 50 h de synthèse pour créer un monocristal de 1 carat), le diamant naturel est alors plus rentable.

Aussi préfère-t-on réaliser des compacts polycristallins (PCD) en effectuant un frittage à haute pression et 1 400 °C pour agglomérer, sous forme de plaque, les grains de diamant.



La partie diamantée est parfois liée, lors du frittage, à un support à base de carbure de tungstène.

Contrairement au diamant naturel, le PCD est *isotrope*, il ne présente ni plan de clivage ni variation de dureté. Celle-ci est un peu inférieure à la valeur maximale de celle du diamant naturel. Le PCD est *plus résistant* (non propagation de critiques) et donc plus résistant aux chocs mécaniques. Il est *bon conducteur thermique et électrique*.

Le PCD, comme le diamant naturel, commence à s'oxyder vers 600 °C à l'air et, à partir de 1 000 °C sous atmosphère protectrice, on assiste à un début de déstabilisation de la structure du diamant qui redevient graphite (graphitisation du diamant).

Selon la compatibilité physico-chimique métal usiné/diamant, la conductivité thermique élevée peut favoriser une *réactivité chimique* qui en limitera les applications.

2.5.3 Mise en œuvre

Diamants naturels

Ils sont utilisés sertis (brasage), en concréte (frittage simple avec matrice métallique abondante), ou à l'état libre (poudre broyée ou *boart*).

Compact polycristallin (PCD)

À partir des plaques issues du frittage, on peut par usinage obtenir la plupart des formes courantes.

Selon les marques et les nuances, la taille des grains de diamant est centrée sur 1,10 et 30 µm.

Les fabricants de revêtements travaillent de plus en plus sur le **revêtement diamant**. Encore cher et à l'état de pré-validation industrielle, il fait également l'objet d'études dans les centres de recherche universitaires.

2.5.4 Utilisation dans l'usinage

À base carbone, les diamants (naturels et synthétiques) ont de ce fait une forte affinité pour les matériaux ferreux et sont donc généralement exclus pour leur usinage. On les utilise particulièrement pour les **métaux tendres** : aluminium, cuivre, magnésium, zinc et leurs alliages, ainsi que pour les matériaux antifriction.

Le diamant sert aussi à l'usinage des métaux précieux (or, platine), des matières plastiques chargées ou non, du bois.

2.6 Nitrule de bore cubique

2.6.1 Propriétés

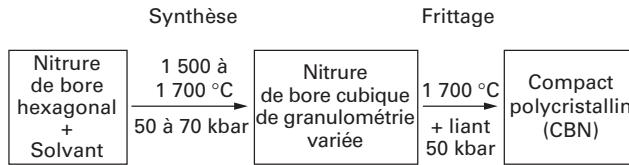
Contrairement au diamant, il ne se trouve pas dans la nature. On l'élabore donc **par synthèse** (première synthèse en 1957 aux États-Unis).

Suivant les conditions, on obtient deux formes :

- **nitrule de bore à structure cubique (CBN)** qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant) ;
- **nitrule de bore à structure hexagonale** de faible dureté (même structure que le graphite).

La forme dure est très difficile à obtenir et les techniques sont voisines de celles utilisées pour la synthèse du diamant. Les cristaux obtenus sont très petits (< 0,5 mm, plutôt vers 50 µm) utilisables pour la réalisation de meules.

Pour fabriquer des outils de coupe, on réalise **par frittage** (premier essai vers 1972) un compact polycristallin (analogie avec le PCD) à matrice céramique ou métallique, éventuellement lié à un substrat en carbure de tungstène.



C'est le matériau connu le plus dur après le diamant (tableau 1). Il présente une résistance mécanique élevée dépendant de la nature et de la quantité de liant.

Sa dureté se maintient à chaud (jusqu'à 1 000 °C), ce qui permet de travailler à des vitesses de coupe très élevées et d'usiner des matériaux durs.

Comme pour le diamant, la réactivité chimique liée au couple matériau usiné/outil de coupe en limite les applications.

2.6.2 Mise en œuvre

Poudre

Elle est constituée par les cristaux de synthèse de différente granulométrie.

Compact polycristallin (CBN)

On obtient par usinage la plupart des formes désirées à partir des plaques issues du frittage (analogie avec le PCD).

Le CBN est commercialisé sous plusieurs formes :

- directement en plaque massive ;
- en plaque carbone revêtue de CBN (le nom de *full-face* est souvent utilisé pour ces plaquettes) ;
- en plaque carbone avec insert brasé ;
- en plaque carbone avec insert directement fritté avec la plaque.

Cela permet de trouver, en fonction de l'application, le meilleur compromis technico-économique.

Exemple : les plaquettes massives en CBN permettent des profondeurs de passe plus importantes que les plaquettes à insert mais leur coût est plus élevé.

2.6.3 Utilisations

Les CBN sont particulièrement adaptés aux **usinages de matériaux durs** (dureté HRC 55, soit environ 595 HV) tels que les aciers traités, fontes alliées (au chrome, molybdène, etc.), alliages de revêtement dur, stellites, aciers à outils, etc. Ils permettent aussi l'usinage de matériaux conventionnels (fontes ordinaires par exemple) à des vitesses de coupe élevées ($> 1 000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) aussi bien en tournage qu'en fraisage.

Dans l'industrie automobile, on utilise maintenant le CBN pour le **fraisage-finition** des faces de carter cylindre en fonte dure ($V_c = 850 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) et l'**alésage-finition** des cylindres ($V_c = 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

L'aptitude du CBN à usiner les aciers traités et la qualité des surfaces obtenues permettent d'envisager dans certains cas le remplacement de la technique d'usinage par rectification, par celle du tournage dur (disques de freins, pignons de boîtes de vitesses, etc.).

La géométrie de ces outils (finition d'arête) a une influence notable sur la tenue en service. L'assise de l'outil doit être excellente, la

machine très rigide, et l'arête de coupe doit être chargée progressivement.

L'usinage au CBN permet de travailler *sans liquide de coupe*, la chaleur engendrée à l'interface pièce-outil passant dans le copeau.

Les performances observées des CBN sont supérieures à celles des céramiques ou *sialons*. Le choix d'utiliser un outil CBN dépendra du contexte économique de l'usinage, l'outil CBN étant encore 5 à 10 fois plus coûteux à l'achat que les outils en céramique.

3. Sélection des matériaux et vitesses de coupe

3.1 Matériaux

La très grande diversité des matériaux de coupe offerts actuellement oblige à opérer des choix. L'importance du couple outil/matière a été démontrée par de nombreuses études récentes [4] [5] [6].

En règle générale, l'usineur a peu de possibilités d'agir sur la matière de la pièce usinée. C'est donc sur l'outil, et par conséquent sur le matériau de coupe, que devra porter toute son attention.

Avant de décider des conditions de coupe, l'usineur devra vérifier l'**aptitude** (ou la **qualification**) du matériau de coupe à usiner la matière de la pièce. Pour cette première étape, l'aide du fabricant d'outils est généralement indispensable et utile. En effet, la plupart des matériaux de coupe sont vendus sous des dénominations commerciales : la connaissance exacte du matériau de coupe (y compris des revêtements s'il y a lieu) est donc parfois délicate à obtenir.

Une fois l'étape de qualification et d'aptitude assurée, il faut **valider techniquement** le matériau de coupe, c'est-à-dire à lui associer des valeurs numériques (vitesse de coupe et avance généralement) de fonctionnement. Ces valeurs numériques sont également liées au type d'outil sur lequel est monté le matériau de coupe.

Ces deux étapes sont entièrement prises en compte par le couple outil/matière. La norme NF E 66-520 donne la méthodologie d'essais à réaliser pour aboutir au bon fonctionnement de l'outil. Les normes type NF E 66-505 (essais normalisés qui permettent de classer les matériaux de coupe dans des conditions de fonctionnement bien définies) ont montré leurs limites et ne sont plus utilisées dans l'industrie.

Les petites et moyennes entreprises ne sont pas équipées pour réaliser des essais d'usinage. Quant aux grandes entreprises, la tendance actuelle est de réduire très fortement (voire supprimer) les services destinés aux méthodes usinage. Les usineurs doivent donc avoir accès directement à des informations techniques fiables concernant le domaine d'emploi des matériaux de coupe. La diversité des références commerciales des fabricants d'outils est telle que cette tâche est pratiquement impossible à réaliser sans l'aide de logiciels (voir Doc. BM 7 080).

Cette même méthode COM sert également à caractériser l'*usinabilité* de la matière usinée.

3.2 Vitesses

Opitz [7] a montré que, toutes choses étant égales par ailleurs, une vitesse de coupe croissante fait apparaître une usure qui augmente jusqu'à un maximum puis diminue jusqu'à un minimum et augmente à nouveau (figure 15).

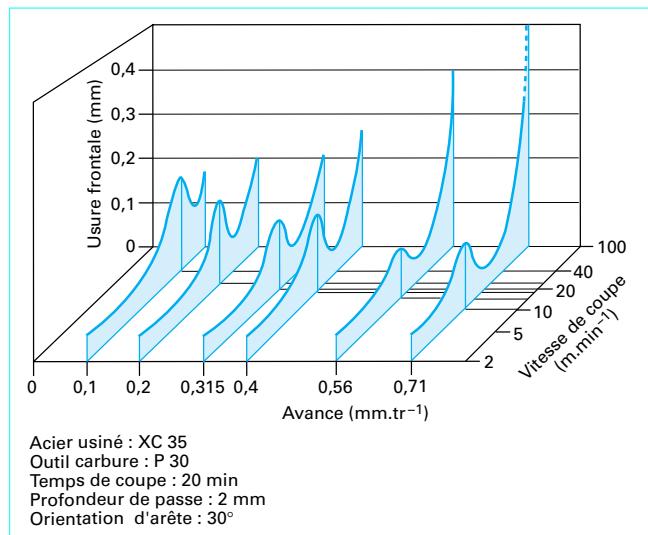


Figure 15 – Influence de la vitesse de coupe et de l'avance sur l'usure de l'outil, d'après [7]

Ce phénomène a été pleinement utilisé en brochage où, alors que la vitesse de $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ constituait un maximum, des essais ont révélé une tranche intéressante au-delà de $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Les conditions de coupe à adopter varient suivant la tenue d'outil recherchée : celle-ci peut aller de 2 min pour une plaquette céramique usinant un acier réfractaire à plusieurs heures pour des outils montés sur des machines complexes (tours automatiques, machines transfert). Dans tous les cas, les calculs économiques devront être jumelés aux calculs techniques de conditions de coupe. Plusieurs critères d'optimisation sont possibles, chaque critère amenant une durée de vie d'outil différente.

Il existe certains graphiques donnant les vitesses de coupe couramment admises en fonction du matériau de coupe ; ces graphiques vont à l'encontre du concept de couple outil/matière développé dans cet article. Il s'avère même que ces graphiques peuvent devenir faux dans certaines configurations d'usinage. Nous préférons donc ne pas les présenter et renvoyer le lecteur à l'article *Matériaux pour outils de coupe. Données numériques* Form. BM 7 080.