

Coupe des métaux 2

Université de M'sila



CH II : Nature et propriétés des outils de coupe

DR : ARSLANE Mustapha

MAB / UNIV de M'sila

Table des matières



Objectifs	3
Introduction	4
I - Chapitre II : Nature et propriétés des outils de coupe	5
1. Interactions pièce/outil/machine	8
1.1. Vibrations de coupe	8
1.2. Broutage	8
1.3. Déformation élastique	9
1.4. Cas des matériaux écouissables	10
1.5. Couple outil/matière	11
2. Principaux types de matériaux pour outils de coupe	11
2.1. Les aciers rapides (HSS)	12
2.2. Autres matériaux utilisés dans les outils coupants	16

Objectifs

L'objectif de la matière "**Coupe de métaux 2**" est d'approfondir les connaissances dispensées dans la matière "**Coupe de métaux 1**". On trouve ainsi, d'autres connaissances avec plus de détails. Ces deux matières visent pour atteindre une bonne compréhension et une maîtrise du phénomène de coupe.

Chapitre II : Nature et propriétés des outils de coupe

I

Les outils de coupe sont des instruments utilisés pour enlever des matériaux de manière sélective afin de donner une forme spécifique à une pièce. Ils sont largement utilisés dans divers domaines tels que l'usinage, la menuiserie, la métallurgie, la construction, etc. La nature et les propriétés des outils de coupe varient en fonction du matériau à usiner et du processus d'usinage.

L'usinage des métaux ou des polymères requiert l'utilisation d'outils de coupe dotés d'excellentes propriétés, notamment une haute dureté à des températures élevées en raison des frottements constants entre l'outil et la pièce, ainsi qu'entre l'outil et le copeau. Ces outils doivent également présenter une résistance à l'usure exceptionnelle et une stabilité chimique pour assurer des performances optimales tout au long du processus d'usinage.



Les premiers outils étaient fabriqués en acier rapide, avec le corps et la partie active de l'outil formant une seule barre. Lorsqu'un tel outil devenait usé, il était affûté pour prolonger sa durée de vie. Cependant, l'évolution des technologies et l'introduction de nouveaux matériaux ont rendu le barreau en acier rapide insuffisant pour répondre aux exigences technologiques actuelles. L'avènement des outils en carbures métalliques, en céramiques, en CBN (nitrure de bore cubique), et en diamant a permis l'exploitation industrielle de ces techniques. La Figure II.1 représente les principaux matériaux utilisés pour les outils de coupe modernes.

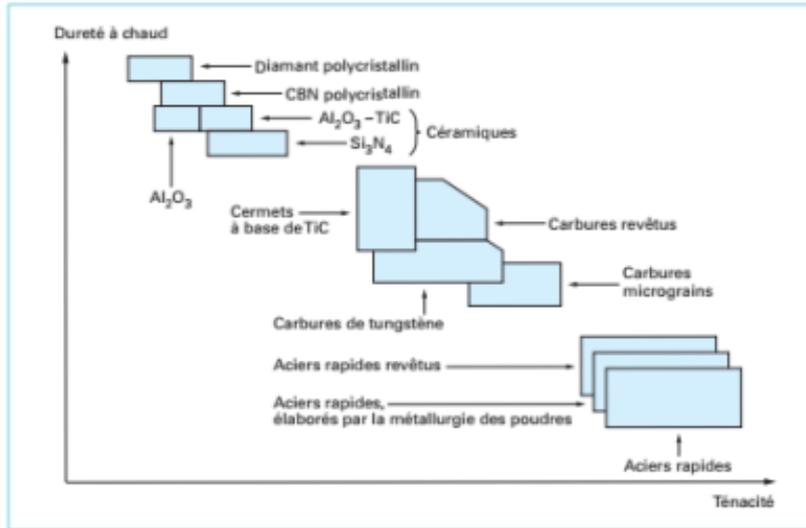


Figure II.1 : Comparaison de matériaux de coupe

Depuis 1900, plusieurs matériaux conservant une dureté à des températures de plus en plus élevées (voir figure II.2.a) ont été successivement introduits, comme illustré dans la figure II. 3. Chaque avancée a permis d'atteindre des vitesses de coupe plus élevées, nécessitant ainsi des machines-outils plus puissantes et rigides.

Pour les arêtes de coupe des outils de machines-outils, on utilise donc une gamme de matériaux classés en six groupes selon leur dureté croissante (voir figure II.2.b) : aciers rapides, carbures, céramiques, cermets, diamants et nitrure de bore cubique polycristallin.

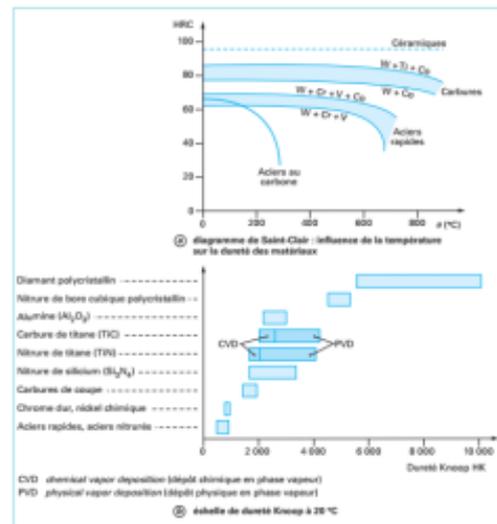


Figure II.2 : Dureté des matériaux constituant l'arête de coupe

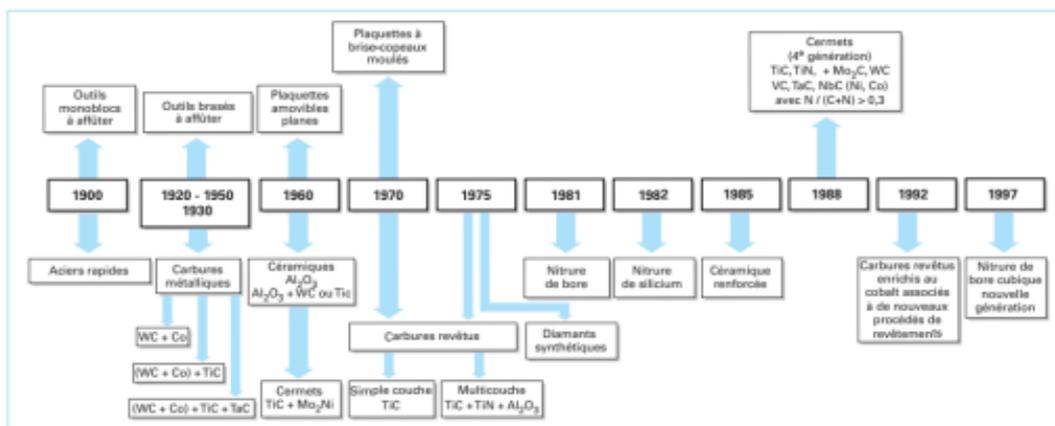
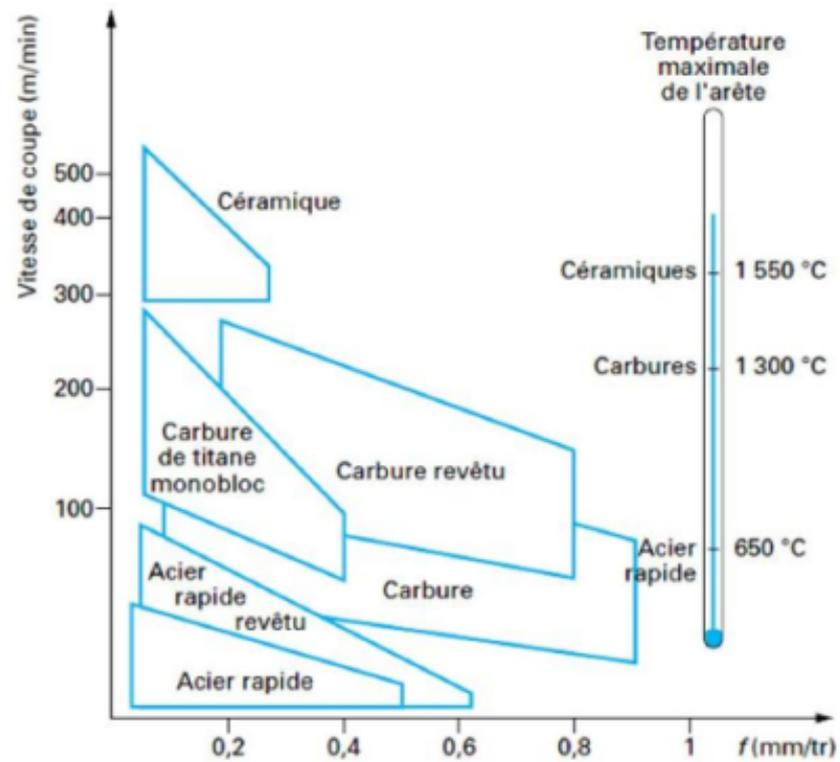


Figure II.3 : Dates d'apparition des matériaux de coupe sur le marché européen

L'optimisation des conditions d'usinage nécessite une recherche approfondie adaptée à chaque combinaison d'outil et de pièce. Cette quête ne peut être réalisée que par le biais d'un protocole expérimental rigoureux. Les nuances d'outils coupants et leurs domaines d'application sont présentés dans la figure II.4.

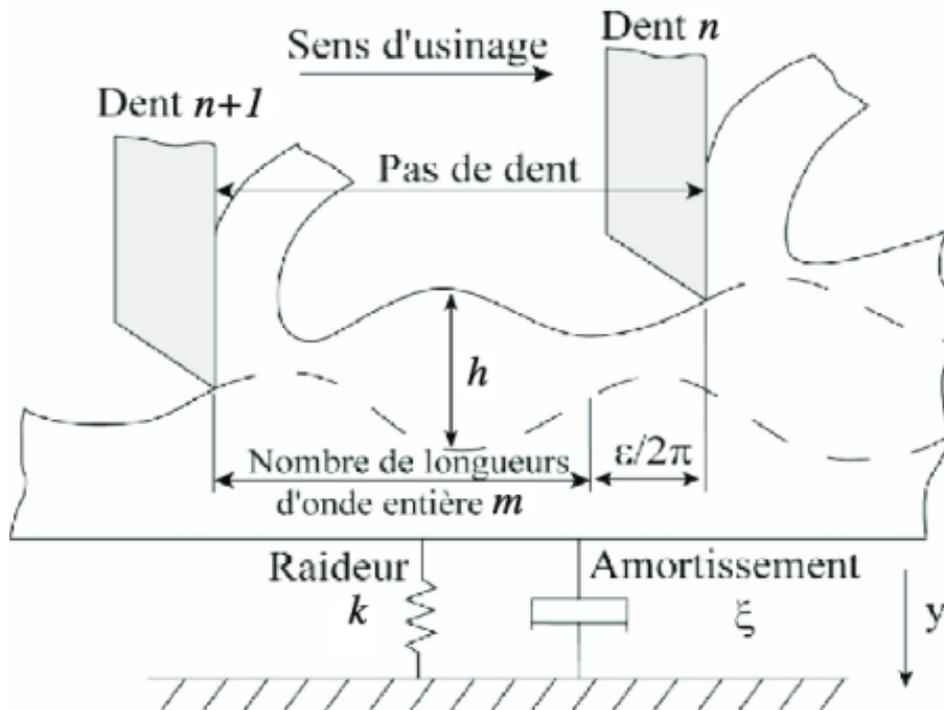


Domaines limites d'utilisation des différents types de matériaux en fonction des paramètres V_c et f .

1. Interactions pièce/outil/machine

1.1. Vibrations de coupe

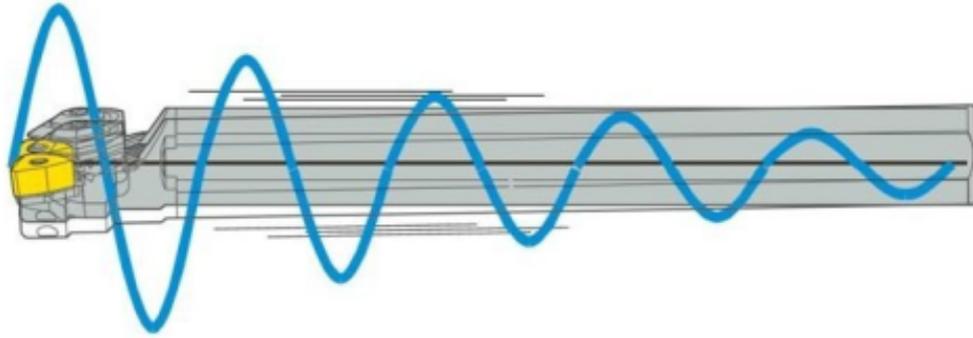
Lors de l'usinage avec des paramètres tels que l'avance, la profondeur de passe, la vitesse de coupe et l'angle de coupe fixés, l'effort de coupe varie de manière périodique. Ces variations entraînent des vibrations forcées qui affectent la pièce, l'outil, le porte-outil, l'attache, la broche et la machine. Ces vibrations, combinées avec les vibrations naturelles des éléments, impactent la surface de la pièce et peuvent également influencer la durée de vie de l'arête de coupe de l'outil. Afin de minimiser ces effets, il est essentiel d'avoir un système outil-machine rigide.



Modèle de coupe avec vibrations

1.2. Broutage

En synthèse, le phénomène de broutage survient lorsque la période des efforts de coupe coïncide avec la période propre de la pièce ou de la machine, entraînant des vibrations importantes et des ondulations sur la pièce, nécessitant parfois l'arrêt de l'usinage. Ce problème peut résulter de défauts d'ajustement, de montage ou d'angle de coupe. Pour y remédier, on peut changer la période de coupe en ajustant la section du copeau ou la vitesse de coupe, modifier la période propre du système en ajoutant des supports ou des masses supplémentaires, ou introduire un amortissement par le biais de surfaces frottantes ou d'outils antivibratoires.



Le broutage en usinage (Chatter en anglais)

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 :

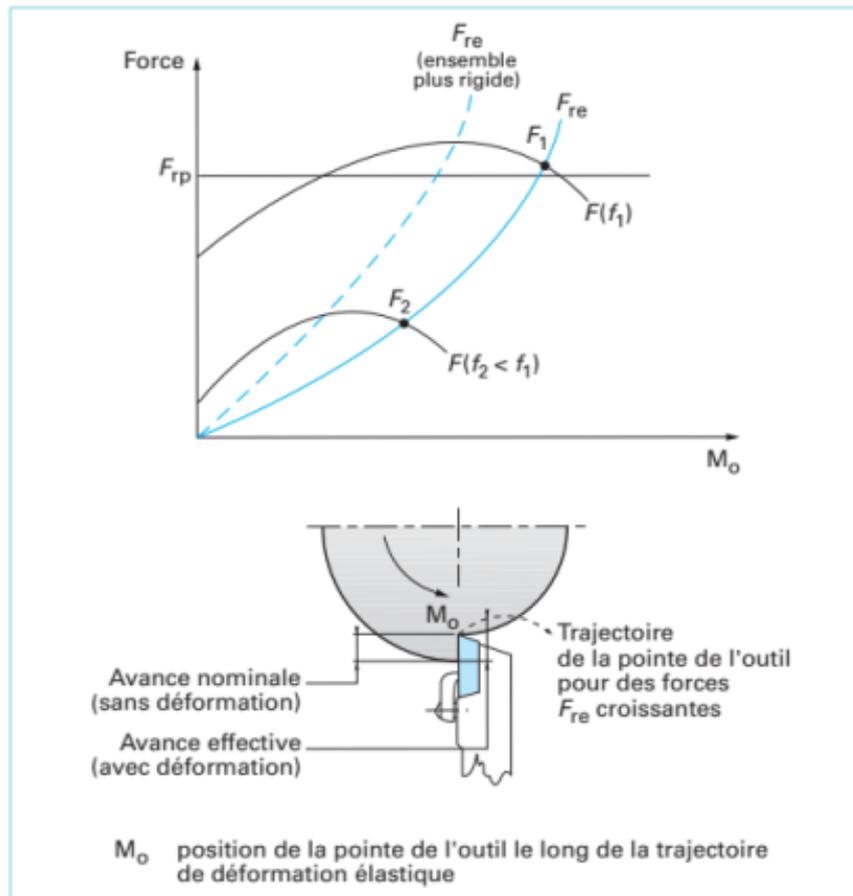
- soit tendre à faire sortir l'arête de coupe de la matière et à diminuer l'épaisseur du copeau (dégagement de l'outil), donc l'effort ; il existe une position d'équilibre. La pièce sera donc plus épaisse que ne le prévoit le réglage de l'outil ;
- soit faire pénétrer l'arête de coupe dans la matière 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/porte-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 dégagante, ou encore, si possible, en inversant l'outil et en travaillant à l'envers.

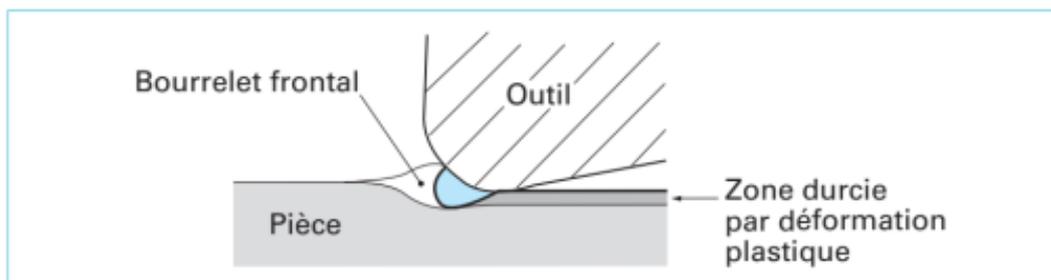
Il y a lieu de noter que, si l'arête de coupe comporte une partie courbe, la trajectoire élastique peut être engagante pour une partie et dégagante pour le reste.



Schématisation de comportement pour un outil

1.4. Cas des matériaux écrouissables

Le développement de la section précédente n'a pas pris en considération la phase initiale de pénétration de l'outil dans la pièce. Pendant cette étape, l'épaisseur nominale du copeau augmente à partir de zéro, passant temporairement par des valeurs inférieures à l'épaisseur minimale. Durant cette phase, en raison de la déformation élastique, l'outil ne forme pas de copeau, mais plutôt un bourrelet frontal, induisant une déformation plastique de la pièce sur une certaine profondeur



Phase initiale de pénétration de l'outil dans la pièce

Cependant, cette phase initiale de pénétration peut entraîner un échauffement significatif de l'arête de coupe. Sa durée est proportionnelle à la flexibilité de l'ensemble outil/porte-outil/machine et à la capacité d'écrouissage du métal usiné. Pour les métaux usuels, l'arête de coupe pénètre dans la pièce sans subir de dommages apparents, et si l'avance est égale ou supérieure à l'avance minimale requise, le copeau se stabilise.

Par contre, pour certains métaux (aciers inoxydables, acier au manganèse), l'écroûissabilité 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.

1.5. Couple outil/matière

L'analyse des éléments jusqu'à présent souligne l'importance cruciale de la notion de couple outil/matière (COM). Pour assurer le bon fonctionnement d'un outil, l'épaisseur du copeau généré doit se situer dans une plage spécifique.

- La valeur minimale, appelée copeau minimal (h_{\min}), varie de quelques centièmes (2 à 3) à quelques millimètres (1,5 à 2). Elle est principalement influencée par la finesse de l'arête (dont la préparation varie d'un type d'outil à un autre), le matériau usiné, la rigidité et l'orientation de l'arête.
- L'utilisation de vitesses de rotation élevées (généralement supérieures à 14000 tr/min) tend à réduire cette épaisseur minimale. Par exemple, lors du fraisage de l'aluminium, des valeurs inférieures à 5 μm sont courantes.
- La performance et la durabilité des outils de coupe sont essentielles dans les opérations d'usinage. Pour garantir une résistance mécanique et thermique optimale de l'arête de coupe et éviter la génération de vibrations excessives, il est crucial de contrôler l'épaisseur maximale du copeau. La vitesse de coupe joue également un rôle déterminant dans la formation du copeau : une vitesse trop basse conduit à la formation de copeaux adhérents, provoquant des vibrations et détériorant l'outil.
- En outre, pour assurer une durée de vie économiquement viable des outils, il est impératif de respecter une vitesse de coupe maximale. Cela souligne l'importance de considérer des facteurs technico-économiques dans la détermination des paramètres de coupe. En résumé, l'équilibre entre la résistance de l'outil, la génération de copeaux et les contraintes économiques est crucial pour optimiser les opérations d'usinage.

2. Principaux types de matériaux pour outils de coupe

Dans un monde industriel en constante évolution, les outils de coupe en usinage jouent un rôle crucial, avec un marché mondial estimé à plusieurs milliards de dollars. Mais comment choisir parmi la vaste gamme de matériaux disponibles ? Aciers rapides, carbures métalliques, céramiques... chaque matériau offre des avantages spécifiques, adaptés à diverses applications.

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

Certains aciers de construction sont couramment choisis pour fabriquer la partie non coupante des outils, tels que les queues de forets ou d'alésoirs, ainsi que les corps d'outils, afin de réduire les coûts.

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 ₂₀)	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 + Co.....K 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 + Co.....P 10	10 000 à 11 500	530 à 550	1 000 à 1 500	1 500 à 1 700	6	35	10
Céramiques							
Alumine.....Al ₂ O ₃	3 900	400	400 à 600	2 400	8	25 à 30	4 à 6
Alumine + zircon.....Al 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 SiC.....Al 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 Ti.....Al 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
Nitride de silicium.....Si 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 naturel.....monocristal	3 520	1 140	(1)	> 9 000	3,1	600 à 2 000	3 à 4
Diamant synthétique.....PCD polycristallin (2)	3 860	920	920	5 000 à 8 000	3,6 à 6	560	8 à 9
Nitride 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.

Tableau 1 – Propriétés physiques de quelques matériaux de coupe

2.1. Les aciers rapides (HSS)

Les aciers rapides, connus sous l'acronyme HSS (High Speed Steel), sont des alliages spécialement conçus pour l'usinage à haute vitesse. Reconnus pour leur dureté exceptionnelle et leur résistance à la déformation sous des températures élevées, ces aciers sont indispensables dans les industries modernes pour leur efficacité et leur polyvalence.

La composition chimique : (0.6 à 1.4%) C+ (3.8 à 4.6%) Cr et (8.5 à 19 %) W.

La résistance à chaud allant jusqu'à 600°C.

Dureté 62 à 65 HRC.

Vitesse de coupe 2 à 3 fois supérieure à celle des outils au carbone.

2.1.1. Types d'aciers rapides et leurs spécificités

a) HSS :

La forme standard, contient 14 à 16 % W, la résistance à chaud = 400 °C, idéale pour l'usinage manuel et des matériaux plus tendres.

b) HSS-E (5% de cobalt)

Améliore la résistance à la chaleur, parfait pour les aciers inoxydables.

c) HSSCo8 (8% de cobalt)

Accroît la vitesse de coupe, utilisé pour les aciers durs et les alliages de titane.

d) HSS-V (au vanadium)

Excellente résistance à l'usure, adapté pour les matériaux générant de longs copeaux.

e) HSS-PM (élaboré par métallurgie des poudres)

Cette technique permet d'obtenir des compositions chimiques et des finesses de structure non réalisables par les méthodes d'élaboration conventionnelles. Il Offre une durée de vie prolongée, idéal pour l'usinage à sec de matériaux difficiles comme le nickel ou le titane.

Le tableau 2 mentionne les compositions chimiques moyennes des principales nuances d'aciers 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.

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'aciers 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 Champagne ;
 – pour les S 390 et S 690 : société Aciers Spéciaux Bohler ;
 – 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).

Tableau 2 – Composition chimique moyenne des principales nuances d'aciers rapides élaborées par la métallurgie des poudres commercialisées en France

Remarque

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 nitrure de bore (type Borazon) se révèlent toutefois efficaces dans ce cas

 **Complément**

Le tableau 03 fournit les compositions chimiques moyennes des principales nuances d'aciers rapides normalisées en France

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

Tableau 3 - Composition chimique moyenne des principales nuances d'aciers rapides normalisées en France

 **Complément**

Le tableau 4 compare les propriétés d'emploi des nuances d'aciers rapides les plus courantes. Avec l'aide du tableau 3, on observe l'influence sur les propriétés de l'acier des divers éléments d'alliage, notamment du cobalt et du vanadium.

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).

Tableau 4 – Comparaison des caractéristiques d'emploi des nuances les plus courantes d'aciers rapides (en unités arbitraires)

2.1.2. Applications pratiques

De nombreux outils coupants, comme les forets, les tarauds et les fraises, sont fabriqués à partir de ces aciers. La raison est simple : ces aciers conservent une dureté élevée même à des températures très élevées. Cette propriété est essentielle pour les opérations d'usinage difficiles, car elle garantit la précision et la qualité de la production industrielle.

2.2. Autres matériaux utilisés dans les outils coupants

2.2.1. Aciers au carbone (1898)

Les aciers au carbone, avec leur teneur typique de 0,8 à 1,05 % en carbone, après traitement thermique, ils peuvent atteindre une dureté de 58 à 64 HRC; la résistance à chaud est de 200 à 250 °C; La vitesse de coupe permise en usinage avec ces aciers 5 à 15 m/min. Ils offrent une solution économique pour des travaux de coupe à faible vitesse. Principalement utilisés pour des opérations de finition, ils combinent coût abordable et performance adéquate dans des conditions de coupe moins exigeantes.

2.2.2. 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. 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 crique 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 ;

Constitués principalement de carbure de tungstène WC, Ils contiennent un liant, souvent le cobalt (Co), et un/ou plusieurs éléments d'addition (W, Ti, Ta, Bo,...), saturés de carbone, ces matériaux offrent une dureté et une résistance à l'usure exceptionnelles. Ils sont idéaux pour les opérations d'usinage à haute vitesse, notamment sur des matériaux durs comme les aciers trempés et les fontes.



Ils sont obtenus par frittage (température + pression) et sont caractérisés par :

- Une résistance à chaud de 1000 °C,
- Une vitesse de coupe allant jusqu'à 250 à 300 m/min,
- Une température d'oxydation de 800°C.

a) Carbures métalliques sans revêtement

La dureté des carbures métalliques (environ 1500 à 2500 HV), très supérieure à celle des aciers rapides non surcarburés (HRC 66 soit environ 865 HV), jointe à une résistance importante (résistance à la flexion de 800 à 2200 MPa) (tableau 1) explique qu'ils sont les plus utilisés. Leur dureté à chaud permet l'usinage jusqu'à une température de 1000 °C.

Ils peuvent être classés en trois catégories :

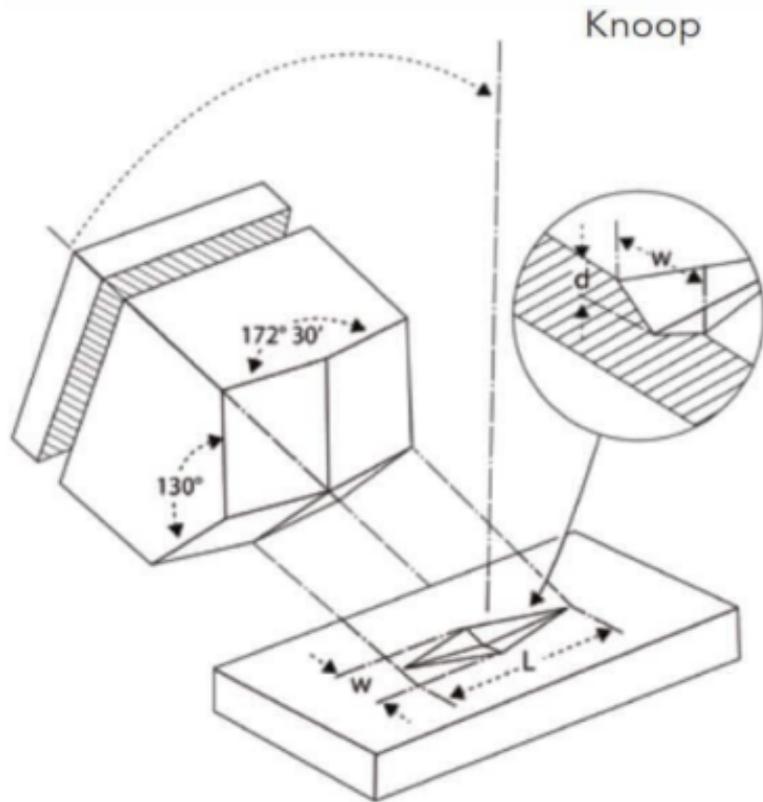
- **Mono carbure**, selon norme ISO, **type K** : Alliage de carbure de tungstène et de cobalt (WC + Co), il est surtout utilisé en usinage des aciers aux copeaux courts,
- **Bicarbures**, selon norme ISO, **type P** : C'est un alliage de carbure de tungstène, de carbure de titane et de cobalt (WC + TiC + Co), ils sont utilisés en usinage des aciers inoxydables aux copeaux longs.
- **Tri carbure ou plus**, selon norme ISO, **type M** : Alliage de carbure de tungstène, de carbure de titane, de carbure de tantale et de cobalt (WC + TiC + TaC + Co), ils sont utilisés en usinage des matériaux friables (comme la fonte) aux copeaux fragmentés.

b) 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 (2000 à 3000 Knoop).

Rappel

L'essai de dureté **Knoop** s'effectue à l'aide d'un pénétrateur en diamant à base losange, dont la grande diagonale est sept fois (plus précisément 7,114 fois) plus longue que la diagonale courte. Cette forme de pénétrateur permet de réduire au maximum le retour élastique. Les essais de dureté Vickers. et Knoop sont réalisés avec la même méthode et le même duromètre. La méthode Knoop mesure toutefois uniquement la longue diagonale, ce qui rend ces essais légèrement plus rapides. La méthode **Knoop** permet surtout d'effectuer plus facilement des essais de dureté sur les couches de faible épaisseur.



Remarque

Les couches les plus usuelles sont le **carbure de titane**, le **nitru de titane**, le **carbonitru de titane** et l'**alumine** (tableau 5). 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 **nitru de hafnium** et de **carbure de chrome** ont été également commercialisés.

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 5 : Comparaison des propriétés de certains revêtements

Ces couches sont obtenues généralement par **CVD** 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** afin de fragiliser le moins possible le substrat carbure.

Rappel

La **CVD, Chemical Vapor Deposition**, s'opère à une **température comprise entre 800 et 1 000 degrés Celsius**. Elle garantit un excellent résultat car elle repose sur une réaction chimique entre le substrat de base, la surface de la pièce et un composé volatil. Ces deux éléments réagissent et forment un matériau solide se déposant à la surface de la pièce. Cette technique s'avère très employée dans la production de filières d'extrusion en carbure, par exemple.

La **PVD, Physical Vapor Deposition**, repose sur un procédé physique. Elle se pratique à une **température nettement moins élevée, allant de 200 à 450 degrés**, et consiste à évaporer sous vide un matériau source pour qu'il se dépose à la surface d'une pièce. Cette méthode s'emploie notamment sur des poinçons, outils coupants et matrices.

Remarque

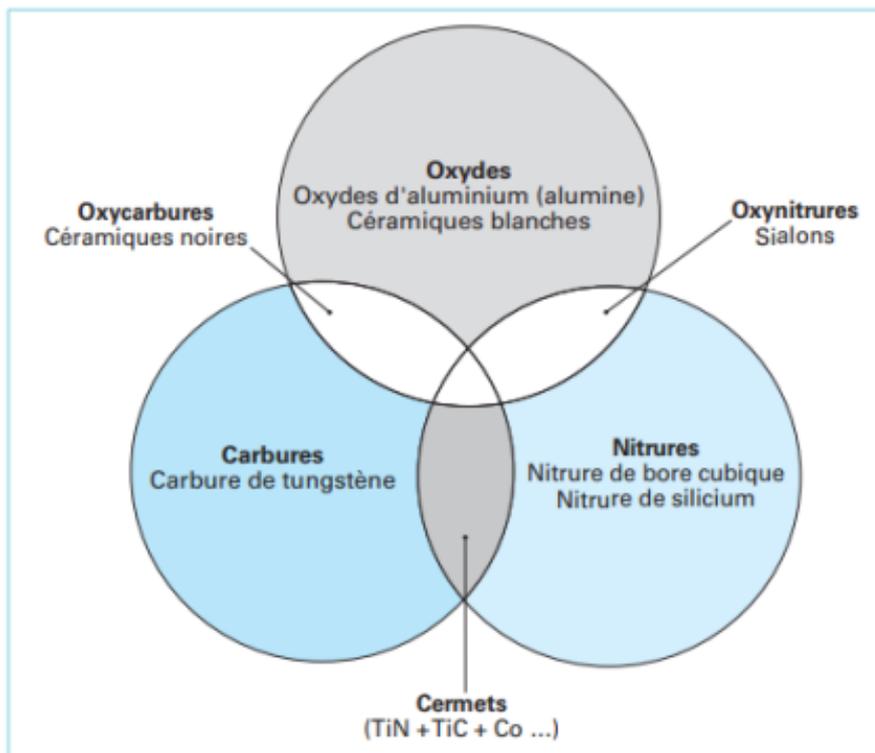
Les nouvelles générations de plaquettes amovibles en carbure revêtu sont généralement très complexes. Le substrat est dit enrichi au cobalt, ce qui signifie que le taux de cobalt est différent au cœur et en périphérie de la plaquette. Cela permet d'améliorer la résistance à l'usure d'où une meilleure 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.

Rappel

Procédé **MTVD (medium temperature vapor deposition)**. Afin de réunir les avantages des deux techniques précédentes.

2.2.3. Céramiques

Les céramiques sont des matériaux frittées sans liant métallique à partir d'oxyde d'alumine, se distinguent par leur grande dureté et leur résistance à l'usure à haute température, donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Elles conviennent particulièrement à l'usinage de métaux ferreux à des vitesses de coupe élevées, bien qu'elles soient sensibles aux chocs. Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe sont réunies dans le tableau 6



Céramiques

Céramiques oxydées	Céramiques mixtes		Céramiques non oxydées
Céramiques blanches	Céramiques mixtes noires	Céramiques renforcées vertes (<i>whiskers</i>)	Sialons gris
Au début : Al_2O_3	Al_2O_3-TiC (30 %)		base Si_3N_4
Actuellement : $Al_2O_3 + ZrO_2$	$Al_2O_3-TiN-TiC$	Al_2O_3 -fibres SiC	
	Al_2O_3-WC, TaC		
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: left;"> <p>← Dureté</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>Ténacité →</p> </div> </div>			

Tableau 6 : Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe

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 1 donnent quelques propriétés physiques de ce matériau et leur comparaison avec celles des aciers rapides et des carbures métalliques.

 **Complément**

D'autres céramiques sont également employées.

Les **céramiques noires** sont des mélanges de **Al₂O₃** et de **carbure métallique (TiC ou WC)** ou de **zircon (ZrO₂)**. Elles sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al₂O₃ aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe.

Le **nitru de silicium Si₃N₄** 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.

 **Remarque**

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 **nitru de titane TiN**

2.2.4. Diamants

a) 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 2000 °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.

Rappel

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 ($3,1 \times 10^{-6} \cdot K^{-1}$), 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 2000 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ facilite l'évacuation de la chaleur de la zone de coupe si bien qu'un diamant qui vient d'usiner paraît froid au toucher.

Attention

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

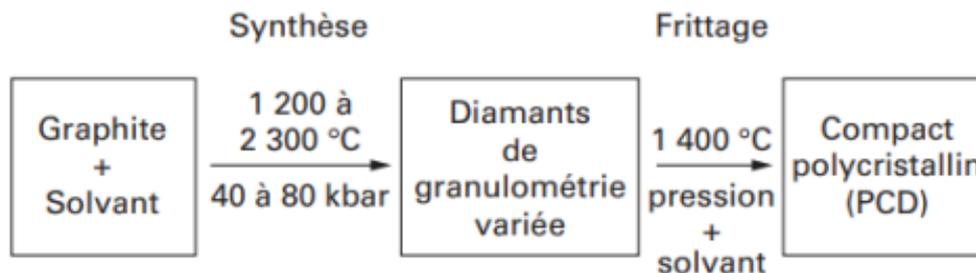
b) Diamant synthétique

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.

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.

Méthode

Aussi préfère-t-on réaliser des compacts **polycristallins (PCD)** en effectuant un frittage à haute pression et **1400 °C** pour agglomérer, sous forme de plaque, les grains de diamant.



◆ Rappel

Le **graphite** est une espèce minérale. Sa formule chimique est « C » mais les formes natives permettent de retrouver des traces d'hydrogène (« H »), d'azote (« N »), d'oxygène (« O »), de silicium (« Si »), d'aluminium (« Al »), de fer (« Fe ») ou encore d'argile.

⚠ Attention

Le PCD, comme le diamant naturel, commence à s'oxyder vers 600 °C à l'air et, à partir de 1000 °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.

📦 Complément

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 prévalidation industrielle, il fait également l'objet d'études dans les centres de recherche universitaires.

i Utilisation dans l'usinage

Les diamants, qu'ils soient naturels ou synthétiques, étant essentiellement composés de carbone, présentent une affinité notable avec les matériaux ferreux, ce qui les rend généralement inappropriés pour leur usinage dans ce contexte. Cependant, leur utilisation est particulièrement répandue dans l'usinage des métaux plus malléables tels que l'aluminium, le cuivre, le magnésium, le zinc et leurs alliages. De plus, les diamants sont également appréciés dans le domaine des matériaux antifriction.

En outre, le diamant est un choix de prédilection pour l'usinage des métaux précieux tels que l'or et le platine, ainsi que pour la manipulation des matières plastiques, qu'elles soient chargées en particules ou non. Même le bois peut être travaillé efficacement à l'aide de cet outil, grâce à la dureté exceptionnelle du diamant. En somme, malgré leur incompatibilité avec les matériaux ferreux, les diamants demeurent des outils de choix pour une variété d'applications d'usinage.

2.2.5. Cermets

Cermet est un terme formé de deux syllabes : cer vient de céramique et met de métal. Ce sont des matériaux élaborés par métallurgies des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) 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). sont spécialement conçus pour les tâches de finition. Leur remarquable résistance à l'usure et leur stabilité chimique en font un choix particulièrement adapté pour le tournage final des aciers inoxydables.

a) Propriétés

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 7 montre l'influence du rapport N/(C + N) sur les propriétés des cermets.

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

Tableau 7 : Comparaison des propriétés physiques et du ratio N/(C + N) des cermets et des carbures de coupe

Complément

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.

2.2.6. Nitrure de bore cubique (CBN)

Le **CBN**, l'un des matériaux de coupe les plus durs, est privilégié pour la finition de matériaux très durs comme les aciers trempés. Sa grande dureté et résistance à l'usure le rendent indispensable pour les applications exigeant une grande précision et une durée de vie élevée de l'outil.

a) Propriétés

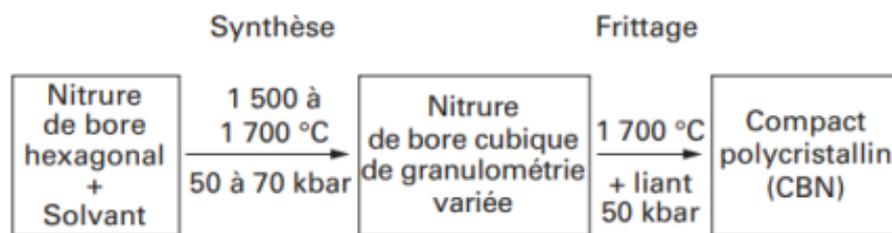
Contrairement au diamant, il ne se trouve pas dans la nature. On l'élabore donc par synthèse (première synthèse en 1957 aux États-Unis). Suivant les conditions, on obtient deux formes :

- **nitru de bore à structure cubique (CBN)** qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant) ;
- **nitru 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.

Méthode

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.



Fondamental

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 1000 °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.

b) 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 (> 1000 m · min⁻¹) aussi bien en tournage qu'en fraisage.

Rappel

Les stellites : Ces alliages coulés, composés principalement de cobalt (44 %), de chrome (33 %) et de tungstène (17 %), sont fabriqués par fusion dans un creuset en graphite. Connus depuis 1907 et développés après les aciers rapides, ils possèdent des propriétés distinctes. Bien qu'ils aient une dureté initiale plus faible que les aciers rapides à température ambiante, leur qualité s'améliore à haute température. Cependant, leur capacité à couper efficacement les matériaux les plus durs a été rapidement supplantée par l'introduction des carbures métalliques.

Exemple

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 ($V_c = 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

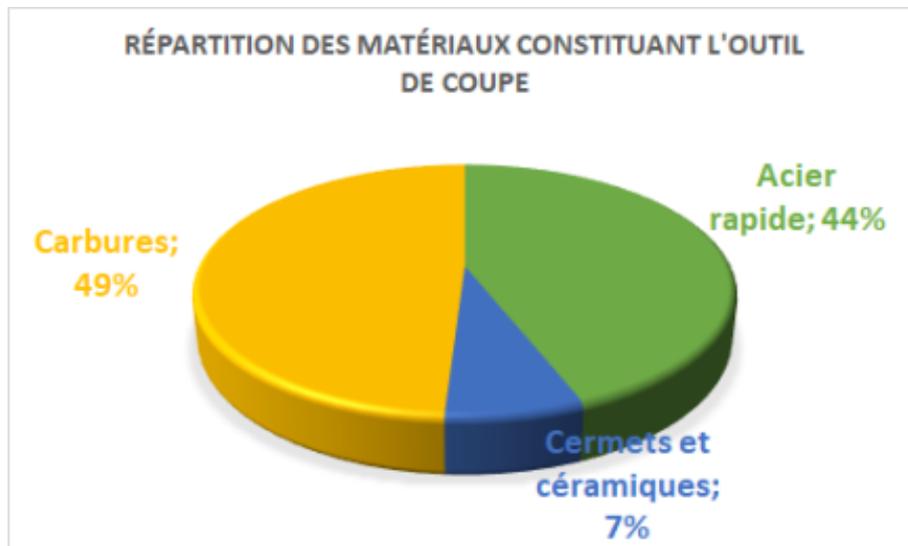
Rappel

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.

Remarque

Répartition des matériaux constituant l'outil de coupe



Répartition des matériaux constituant l'outil de coupe