

Endommagement des outils de coupe

par **François LEROY**

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

1. Description des contacts copeau-outil et pièce-outil	B 7 042 - 2
1.1 Géométrie des outils	— 2
1.2 Description de la racine du copeau	— 3
1.3 Cartes de températures.....	— 4
1.4 Géométrie des copeaux	— 4
1.5 Tribologie des contacts copeau-outil et pièce-outil	— 4
1.5.1 Corps ① : le copeau	— 5
1.5.2 Corps ② : l'outil	— 6
1.5.3 Corps ③	— 6
2. Mécanismes endommageants des outils de coupe.....	— 8
2.1 Endommagement induit par les dépôts macroscopiques	— 8
2.2 Endommagement induit par les dépôts microscopiques	— 9
2.3 Endommagement induit par les débris	— 10
3. Méthodes de mesure des endommagements.....	— 10
3.1 Méthodes d'examen et d'analyse de la surface des outils et des pièces usinées.....	— 10
3.2 Méthodes de mesure des températures de coupe	— 11
3.2.1 Mesures pendant l'usinage.....	— 11
3.2.2 Mesures après l'usinage	— 11
3.2.3 Mesures séquentielles pendant et après l'usinage.....	— 11
3.2.4 Exemple de mesure.....	— 11
3.3 Méthodes de mesure des efforts et des puissances de coupe.....	— 11
3.4 Lois d'usure d'outil mesurées par des essais d'usinabilité.....	— 12
4. Choix assisté par ordinateur des conditions de coupe.....	— 13
5. Conclusion	— 13
Pour en savoir plus.....	Doc. B 7 042

Les outils de coupe ont une géométrie généralement complexe qui résulte assez souvent de mises au point d'atelier purement empiriques, quelquefois d'études plus analytiques à partir de divers critères (résistance à l'endommagement ou qualité de la surface générée), rarement d'une véritable optimisation qui nécessiterait une modélisation de l'écoulement du ou des copeaux.

Le lecteur se reportera utilement à l'article **Modélisation de la coupe des métaux** [B 7 041] dans ce traité.

1. Description des contacts copeau-outil et pièce-outil

1.1 Géométrie des outils

Quelle que soit la technique d'usinage employée, un outil comprend (normes dans la fiche documentaire [Doc. B 7 042]) :

- **une ou plusieurs zones tranchantes** que l'on peut décrire comme des dièdres élémentaires (figure 1) définis par des faces A_α et A_γ et une *arête d'intersection*. La face A_α est appelée *face de dépouille* et la face A_γ *face de coupe*. Le nombre de dièdres élémentaires dépend de la technologie de la machine-outil : si un outil de tournage a généralement la géométrie la plus simple (une seule zone tranchante active), un foret de perçage classique en possède deux qui sont simultanément actives et un *tourteau* de fraisage peut avoir plusieurs dizaines de dents, dont plusieurs sont en prise en même temps. La géométrie des zones tranchantes est souvent plus complexe que celle d'un dièdre simple : les techniques de frittage des matériaux des outils modernes permettent d'obtenir des *faces de coupe* ayant des courbures complexes étudiées pour contrôler la géométrie des copeaux ; les performances des machines d'affûtage permettent de réaliser des faces A_α et A_γ non planes ainsi que des arêtes non rectilignes. Notons, enfin, qu'en règle générale l'outil est en contact avec la pièce sur la *face de dépouille principale* A_α , sur la *face de dépouille secondaire* A'_α et sur la partie arrondie intermédiaire appelée *bec* (figure 1) ;

- **des zones de guidage du copeau** soit pour faciliter son évacuation, soit pour le stocker provisoirement. Ainsi, les goujures hélicoïdales d'un foret sont des chemins de passage obligés pour le copeau tant que l'outil n'est pas sorti hors du trou en cours de perçage, les espaces interdents d'une broche sont des logements conçus pour contenir le copeau, etc. ;

- **des zones assurant la résistance mécanique de l'outil**. Si l'on ne considère que le dièdre élémentaire de chaque zone tranchante (figure 1), la fonction de coupe est assurée essentiellement par l'arête, la surface de la face de coupe et une très faible partie de la face de dépouille en contact avec la pièce. L'angle α est toujours choisi le plus faible possible (quelques degrés) ; son choix dépend du matériau usiné. L'angle β entre les faces A_α et A_γ est déterminé par des critères de résistance. Il est très souvent voisin de 90° .

On appelle γ angle de coupe tel que :

$$\gamma = 90^\circ - \alpha - \beta$$

Si γ est positif, on parle de *coupe positive* ; dans le cas contraire, l'outil a une *coupe négative*. Un angle de coupe positif assure l'action tranchante la plus efficace. Il est généralement compris entre 0 et 10° pour les matériaux ferreux. On peut travailler avec un angle γ allant jusqu'à 20° si le matériau usiné est mou, collant (aluminium par exemple) et si le matériau usinant résiste bien aux chocs. Le principal avantage d'une géométrie d'outil avec angle de coupe négatif est la robustesse de l'arête. Au-delà des zones tranchantes, certains paramètres de la géométrie de l'outil sont choisis de telle manière que ce dernier ait une grande rigidité. On ne peut, par exemple, augmenter le volume des goujures d'un foret sans nuire à sa résistance au flambage.

Pour pénétrer dans la matière, l'outil est soumis soit à un effort extérieur s'il travaille par translation (plaquette de tournage, broche, etc.), soit à un couple extérieur et à un effort de pénétration axial s'il est en rotation autour d'un axe Z et en translation suivant Z (foret de perçage, alésoir, etc.), soit à un couple et à un effort extérieur si sa cinématique est plus complexe (fraise, etc.). Le travail fourni sert :

- à créer le copeau : on observera au paragraphe 1.2 que le travail fourni est utilisé pour déformer le matériau usiné et pour vaincre

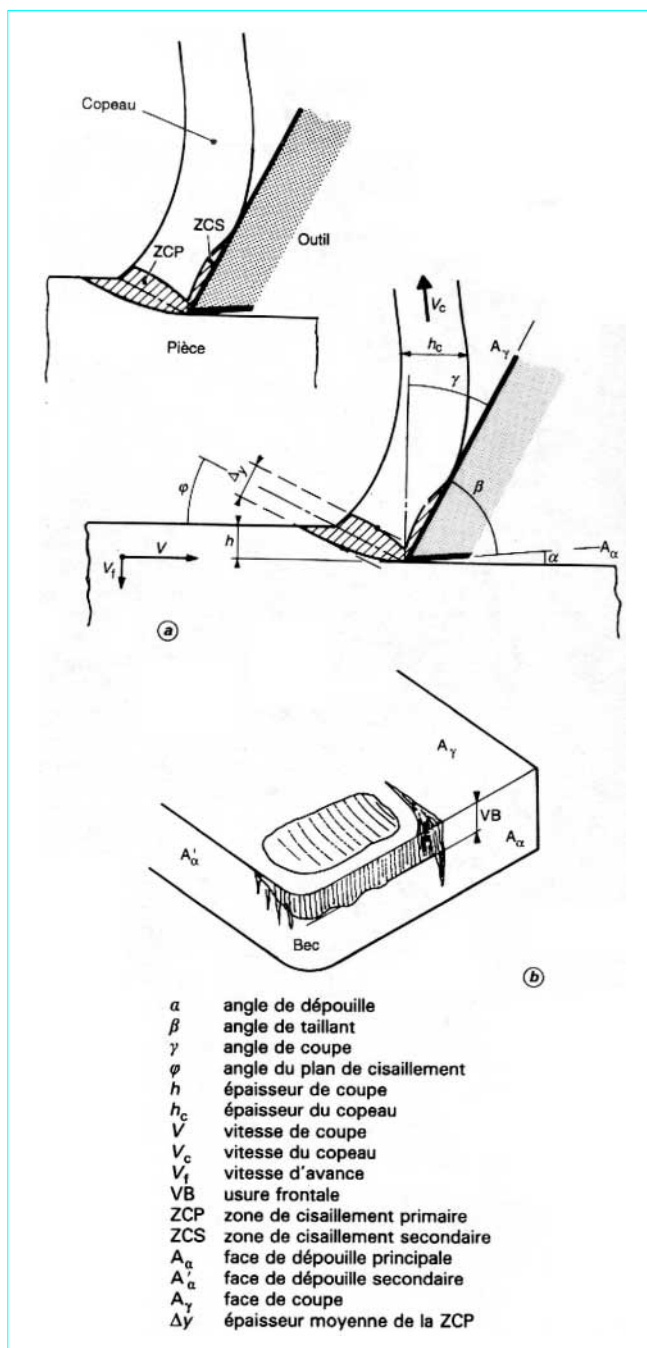


Figure 1 – Formation du copeau (a) et usure de l'outil (b)

les frottements à haute température au voisinage de l'arête de coupe. À géométrie constante de l'outil, ce travail dépend beaucoup des matériaux usiné et usinant. Il est peu modifié par le lubrifiant de coupe utilisé. Là où se crée le copeau, le *confinement* est tel que le frottement est sec, même si un arrosage important de la zone de coupe est réalisé ;

- à faire cheminer le copeau : une part du travail fourni, plus ou moins importante selon la géométrie de l'usinage et le matériau

usiné, est utilisée pour vaincre les frottements à basse température hors de la zone de coupe : ce travail dépend en partie du choix du fluide de coupe et de son débit. Pour une opération telle que le perçage vertical, l'emploi de forets avec circulation interne d'huile de coupe permet d'utiliser le fluide pour *pousser* le copeau et lubrifier les contacts.

La plupart des techniques de mesures des efforts et couples sur un centre d'usinage (§ 3) ne permettent pas de séparer les travaux de formation et d'évacuation des copeaux.

1.2 Description de la racine du copeau

On considérera seulement dans la suite de cet article ce qui se passe au voisinage d'un seul tranchant de l'outil. Ce dernier est soumis à un effort et animé d'un mouvement relatif par rapport au matériau usiné. Il enlève un copeau en créant deux surfaces vierges : la face interne du copeau et la surface usinée.

La formation du copeau s'effectue par un cisaillement du métal dans une zone en amont de l'arête de l'outil, située de part et d'autre d'un plan faisant un angle φ (figure 1) avec la surface usinée. On trouvera une description de la géométrie de cette zone appelée **zone de cisaillement primaire** (ZCP) dans l'article *Usinage et usinabilité* [M 725] du traité Matériaux métalliques.

Le mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce peut être décomposé en un mouvement primaire sans avance (le copeau serait arraché à la pièce pendant seulement une révolution) et un mouvement d'avance, qui permet de maintenir l'outil engagé dans la pièce.

La vitesse de coupe V est la vitesse d'un point de la matière usinée qui arrive sur l'arête de l'outil dans la direction du mouvement primaire. Soit h l'épaisseur du copeau non déformé (figures 1 et 2). L'avance par tour f est le déplacement relatif de la pièce par rapport à l'outil pour une rotation d'un tour de la pièce ou de l'outil. h peut être relié à f par une relation trigonométrique simple, comme on peut le voir sur la figure 2 qui illustre le cas d'une opération de tournage. L'épaisseur du copeau déformé est h_c .

Plusieurs remarques doivent être faites pour situer la spécificité de l'usinage en tant que technique de mise en forme.

■ **Amplitude des déformations** : dans une représentation simplifiée de type Merchant (article *Modélisation de la coupe des métaux* [B 7 041]), le cisaillement Γ est égal à :

$$\Gamma = \cos \gamma / \sin \varphi \cdot \cos (\varphi - \gamma)$$

Lorsque l'on utilise un outil tel que γ soit égal à $+10^\circ$ et si, par hypothèse, le matériau usiné se cisaille sous un angle φ de 25° , on atteint dans la ZCP un cisaillement de 2,4, amplitude de déformation nettement supérieure à celles imposées au cours des principales opérations de mise en forme sans copeaux.

■ **Paramètres liés à la vitesse d'usinage** : la vitesse de coupe V est un paramètre technologique choisi par l'usineur soit sur la base de son expérience, soit à partir de calculs d'optimisation (§ 3.4). Les ordres de grandeur usuels de V (usinages conventionnels) sont les suivants :

— alliages légers	150 à 1 000 m/min
— fontes	100 à 700 m/min
— aciers de construction	70 à 500 m/min
— alliages de titane	20 à 100 m/min

La vitesse du copeau V_c (figure 1) se déduit directement de la vitesse de coupe V et du rapport entre les épaisseurs de copeau non déformé et déformé :

$$V_c = V h / h_c$$

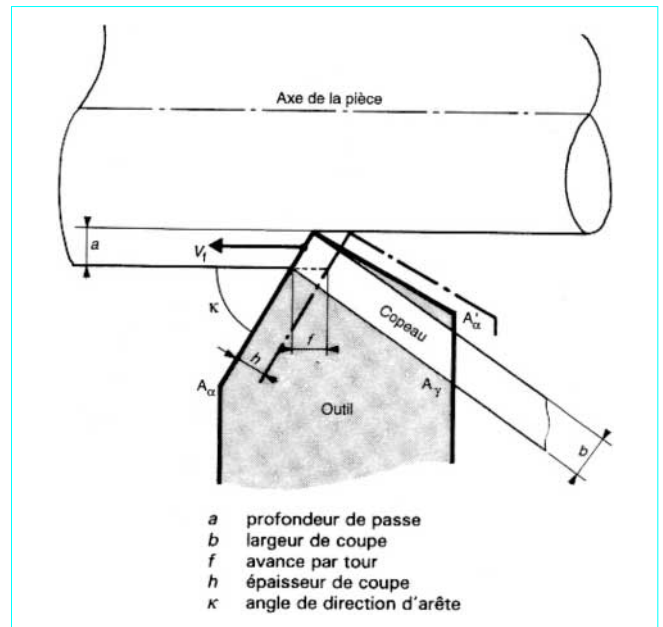


Figure 2 – Paramètres de coupe rapportés à la pièce (cas d'un tournage)

V_c est du même ordre de grandeur que V (en général voisin de sa moitié).

La vitesse de cisaillement $\dot{\Gamma}$ n'est calculable qu'en choisissant une modélisation. En restant dans le cas simplifié type Merchant, on peut montrer que :

$$\dot{\Gamma} = V \cos \gamma / \Delta y \cos (\varphi - \gamma)$$

avec Δy épaisseur moyenne de la zone de cisaillement primaire.

Des mesures faites par visioplasticité dans le cas d'usinage d'acier type XC42 à $V = 150$ m/min (2,5 m/s), avec $\gamma = 10^\circ$, $\varphi = 25^\circ$ et $\Delta y = 100 \mu\text{m}$, conduisent à une valeur estimée de la vitesse de cisaillement de $2,5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Plus généralement, la vitesse de cisaillement d'un acier dans la ZCP est comprise entre 10^4 et 10^5 s^{-1} . Une telle vitesse est très supérieure aux vitesses rencontrées dans les principales techniques de mise en forme.

On ne décrit pas complètement les déformations subies par le matériau du copeau si on limite l'examen de la racine du copeau à la seule zone de cisaillement primaire.

Le copeau reste en contact avec l'outil dans des conditions de vitesse et de pression qui sont celles d'un frottement sec collant. On a pu dire [8], dans le cas de la plupart des techniques de coupe, qu'« usiner c'est provoquer un *grippage entretenu* » : les deux *antagonistes*, copeau et outil, ont une dureté très différente ; celui qui a la moindre résistance (le copeau) est en permanence renouvelé. Le grippage n'aboutit pas à une ruine quasi instantanée, mais le second antagoniste (l'outil) peut subir néanmoins des endommagements sévères qui sont décrits au paragraphe 2. La surface frottante du copeau atteint une température considérable (figure 3). La couche déformée par cisaillement de la face interne du copeau est généralement appelée **zone de cisaillement secondaire** (ZCS, figure 1).

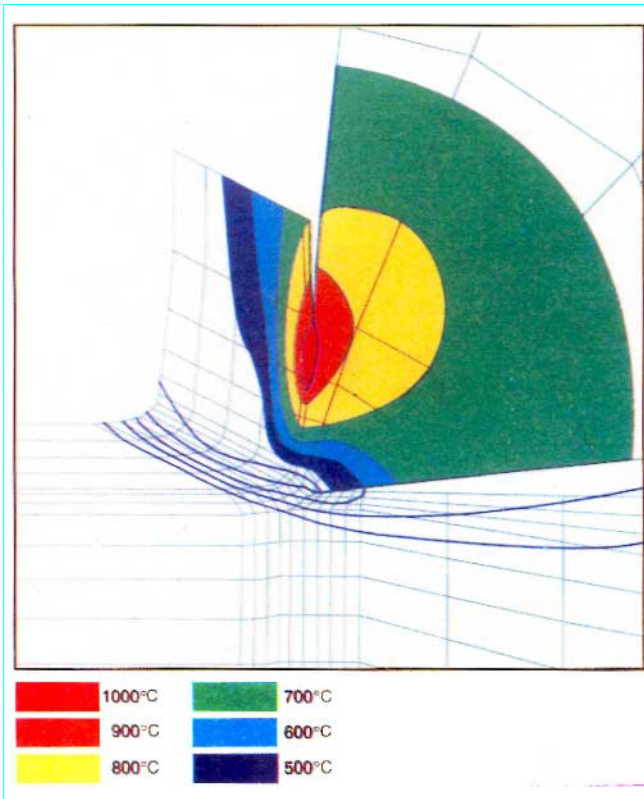


Figure 3 – Carte de températures dans un copeau et dans l'outil obtenue par modélisation thermomécanique [2]

1.3 Cartes de températures

Le travail fourni pour créer un copeau est presque intégralement transformé en chaleur. Celle-ci est évacuée :

- par le copeau ;
- par la pièce, ce qui a des conséquences éventuelles sur la stabilité dimensionnelle, la précision des cotes, l'intégrité structurale du matériau usiné, etc. ;
- par l'outil et le porte-outil, ce qui peut modifier la précision des cotes, les cinétiques des endommagements, etc.

Il est difficile de déterminer avec précision la carte des températures à la racine d'un copeau. On mesure facilement les températures d'une pièce et de la face externe d'un copeau. Il est plus difficile (§ 3.2) de mesurer les températures à l'interface copeau-outil. Malgré ce handicap, les modélisations thermomécaniques de l'écoulement de la matière usinée sur un outil ont fait suffisamment de progrès pour permettre le tracé de réseaux vraisemblables d'isothermes. Ainsi la figure 3, obtenue par G. Bittes [2] en utilisant le code *Sysweld*, correspond au cas de l'usinage à 100 m/min d'un acier mi-dur avec outil en carbure de tungstène. On observe que le cisaillement primaire est globalement responsable d'une température de 350 °C à la racine du copeau. Le cisaillement secondaire provoque sur la face interne du copeau un échauffement jusqu'à 1 100 °C. L'outil est soumis à un fort gradient de température. La peau de la pièce, quant à elle, atteint 200 °C pendant un court instant.

1.4 Géométrie des copeaux

Dans la ZCP (figure 1), le matériau usiné est soumis à des déformations intenses à grande vitesse. Si la trajectoire de l'arête tranchante de l'outil sort périodiquement de la pièce, le copeau est fragmenté par discontinuité de la coupe (cas du fraisage, par exemple). Plusieurs cas peuvent être rencontrés lorsque l'arête de l'outil reste continûment en prise (cas de coupes continues comme le tournage ou le perçage) :

- **le matériau usiné est fragile** : une fissure se propage dès le début du cisaillement. L'amorce de copeau se détache de la pièce avant même qu'un ruban de matière ne se soit formé : on obtient de la limaille (cas de la fonte par exemple) ;

- **le matériau usiné est ductile** et l'échauffement dans la ZCP ne permet pas d'effacer l'écrouissage dû au cisaillement : un ruban de matière est créé, dont la dureté est supérieure à celle du matériau usiné et dont la ténacité est faible (fragilisation due au fort écrouissage). Il suffit souvent d'imposer à ce ruban un rayon de courbure petit ou une trajectoire qui le conduise à rencontrer un obstacle, pour qu'il se casse. Parfois la ténacité du ruban est suffisamment élevée pour que sa fragmentation mécanique devienne une contrainte d'atelier très coûteuse. Qu'ils soient ou non fragmentés, tous ces copeaux sont formés en régime de déformation plastique stable ;

- **le matériau usiné est ductile**, mais l'adoucissement dû à l'échauffement compense le durcissement dû à l'écrouissage. Périodiquement le régime de cisaillement stable est remplacé par un cisaillement localisé instable. Ce cas est d'autant plus probable que le matériau usiné est plus mauvais conducteur, a une plus faible écrouissabilité, que l'outil est plus isolant et que l'énergie thermique qu'il faut dissiper est plus grande (donc que la vitesse est plus grande, tous paramètres identiques par ailleurs). Le copeau est constitué d'une succession de zones très déformées et de zones peu déformées (figure 4). Il peut donner l'impression d'être un ruban continu, mais sa face externe est en *dents de scie* et il est facilement clivable sur les plans de cisaillement instable. Il peut aussi ressembler à de la limaille.

Pour un matériau usiné tel que l'acier, on passe continûment du cas du copeau ductile obtenu par cisaillement stable au cas du copeau pseudo-fragile obtenu par cisaillement instable.

1.5 Tribologie des contacts copeau-outil et pièce-outil

La formation du copeau implique le triple frottement sec de deux corps pressés l'un contre l'autre (figure 1) :

- le système C-O : copeau-outil côté face A_γ ;
- le système P-O : pièce-outil côté face A_α ;
- le système P-O : pièce-outil côté face A'_α .

Ces trois types de contact ne sont pas équivalents : le premier se produit à haute température en condition de confinement, le deuxième à température modérée en condition de semi-confinement et le troisième à température modérée en condition de non-confinement. Si l'on met à part les ruines d'outils par écaillages et micro-écaillages, on peut observer que les systèmes C-O (A_γ), P-O (A_α) et P-O (A'_α) donnent lieu plus ou moins rapidement à trois faciès d'endommagements macroscopiques (figure 1) :

- **une plage d'usure plane sur la face A_α** en dépouille principale, dont la hauteur moyenne est couramment désignée par le symbole VB. Quand VB croît, l'arête de coupe recule et les cotes s'écartent de la valeur visée ;

- **le creusement d'un cratère sur la face de coupe A_γ** , dont la profondeur maximale est couramment désignée par le symbole KT. La résistance mécanique de l'outil décroît lorsque KT augmente ;

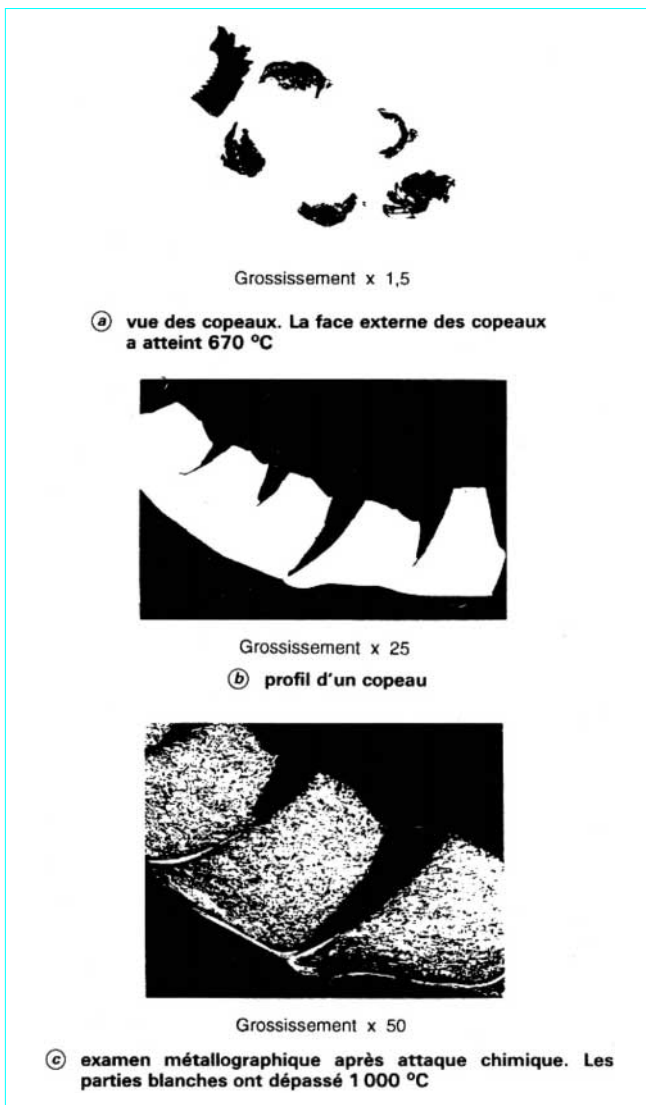


Figure 4 – Aspect des copeaux d'un acier 42CD4 usiné à 500 m/min par tournage avec des outils en céramique

— le creusement d'un sillon sur la face A_α en limite de zone de coupe et d'une multitude de petits sillons sur la face A'_α . L'état de la surface usinée est d'autant plus détérioré que ces sillons sont plus développés [11].

La figure 5 est la photographie d'un outil ayant foré 3 m à l'intérieur d'une barre d'acier 42CD4 à la vitesse de 80 mm/min. On remarque une cratérisation profonde et une plage d'usure frontale irrégulière.

Il est nécessaire de se préoccuper de l'évolution des trois systèmes ci-dessus dont dépendent la productivité et la qualité des usinages. Dans ce texte, on se limitera à l'analyse du seul système C-O.

Le frottement sec de deux corps sous une pression de contact élevée conduit fréquemment à la constitution d'un troisième corps plus ou moins stable entre les deux premiers. Passons en revue les paramètres spécifiques de chacun des trois corps ①, ② et ③ qui déterminent l'évolution de ce système frottant C-O.

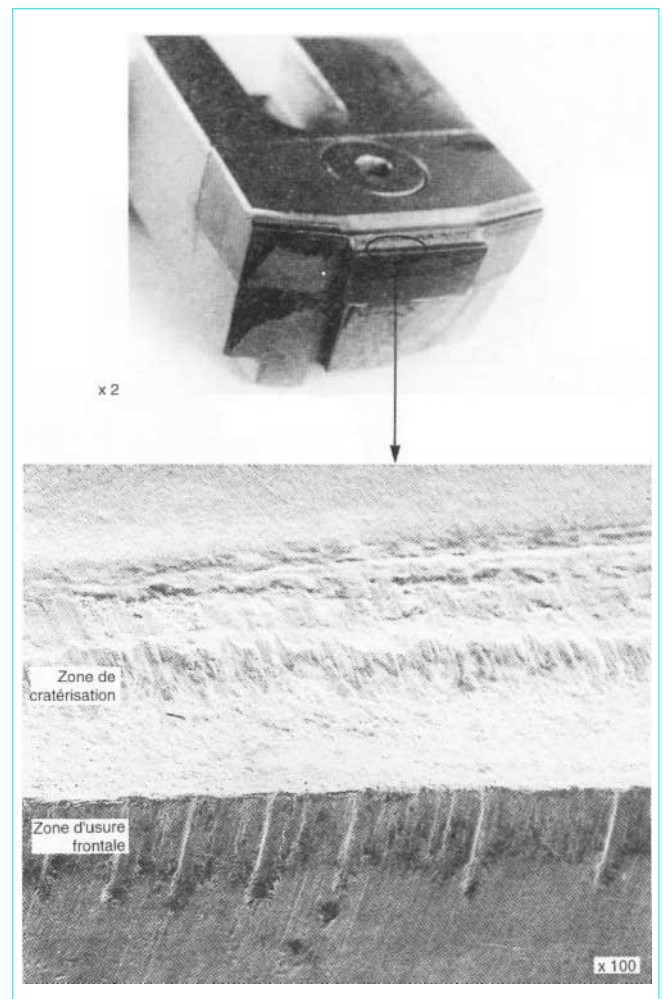


Figure 5 – Essai de forage sur acier 42CD4 : état de l'outil après forage de 3 m, à la vitesse de pénétration de 80 mm/min

1.5.1 Corps ① : le copeau

Pour une approche approfondie des interférences entre l'endommagement de l'outil par le copeau et les caractéristiques structurales de tel ou tel matériau usiné, le lecteur se reportera aux articles consacrés à l'usinabilité de chacun d'entre eux dans le traité Matériaux métalliques. On trouvera seulement ci-après une liste type des paramètres du corps ① qu'il est très souhaitable de prendre en compte (figure 6).

■ Le copeau se différencie du matériau usiné par l'intense déformation et par le cycle thermique subi. Ainsi, dans le cas d'un acier qui a (sauf exception) une structure cubique centrée à température ambiante, la face interne du copeau a très souvent une structure cubique face centrée.

■ Le copeau est rarement monophasé ; les mécanismes endommageants vont dépendre de chaque famille de phases, et notamment :

— de leur quantité respective et de leur dureté à chaud après écrouissage ;

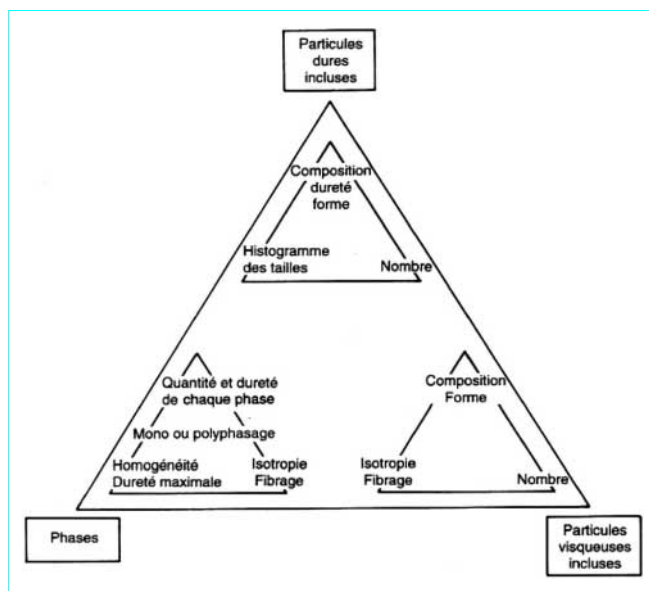


Figure 6 – Paramètres du comportement du corps ①

— de leur répartition et notamment de leur homogénéité et de leur isotropie ;

— de leur histoire thermomécanique et notamment des étapes de la mise en forme des pièces, qui précèdent l'usinage. C'est ainsi qu'il peut souvent y avoir des écarts d'usinabilité entre une barre laminée et une pièce forgée à chaud à partir de cette même barre.

■ Le copeau peut contenir des particules incluses dans ses phases : les *inclusions*. On distingue couramment entre :

— les particules qui ont une grande dureté dans la ZCS (à la température du contact copeau-outil). Ce sont des phases réfractaires telles que des oxydes, des nitrures ou des carbures. Généralement leur existence est une conséquence du processus d'élaboration du matériau usiné. Pour évaluer leurs effets endommageants pour l'outil, il faut tenir compte de leur composition, de leur taille, de leur morphologie et de leur nombre ;

— les particules visqueuses à la température de coupe dans la ZCS. Fréquemment, elles contribuent à constituer le corps ③ et ralentissent l'endommagement. Souvent leur existence est volontairement provoquée par celui qui fabrique le matériau usiné. Leur efficacité peut dépendre de leur composition, de leur forme, de leur taille et de leur nombre. Il faut noter que ces deux derniers paramètres sont dépendants de l'histoire thermomécanique de la pièce avant usinage.

1.5.2 Corps ② : l'outil

Pour les mêmes raisons que dans le cas du corps ①, il n'est pas possible de décrire ici les particularités de chaque matériau utilisé pour réaliser un outil. On trouvera seulement ci-après une liste type des paramètres du corps ② qu'il est possible de prendre en compte pour analyser son comportement (figure 7).

■ L'outil est soumis à un gradient thermique important. Il peut travailler en subissant des cycles thermiques fréquents soit parce que la coupe est discontinue (type fraisage), soit parce que l'efficacité de l'arrosage dépend de sa position (cas du perçage : le foret est plus refroidi hors du trou qu'au fond du trou). Des phénomènes tels que la fatigue thermique vont dépendre de la conductivité du matériau de l'outil, de son coefficient de dilatation, de son module d'élasticité E , etc.

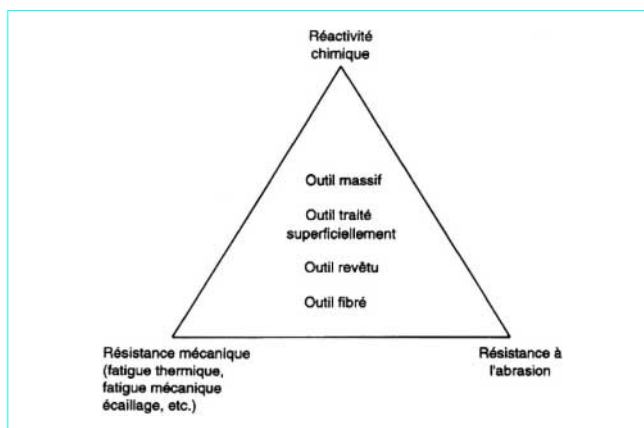


Figure 7 – Paramètres du comportement du corps ②

■ L'outil est soumis à des sollicitations mécaniques qui dépendent des conditions de coupe, de la rigidité du contact pièce-outil, de la technique d'usinage. Des endommagements, tels que la fatigue mécanique, l'écaillage, l'attrition (§ 3.2), dépendent de la dureté du matériau de l'outil, de sa compacité, de sa ténacité, etc.

■ L'outil est en contact intime avec le copeau à haute température. À chaque dégagement, sa face de coupe est exposée au contact de l'air ambiant. Il faut donc considérer la réactivité chimique entre le matériau de l'outil et :

- soit l'élément principal du matériau usiné ;
- soit telle ou telle phase incluse du matériau usiné ;
- soit un constituant de réaction du matériau usiné avec l'air ambiant ;
- soit l'air ambiant (résistance à l'oxydation de l'outil).

■ L'outil est endommagé par les phases dures ou les inclusions abrasives du matériau usiné. Sa résistance dépend de sa dureté à chaud, de sa compacité, etc.

■ Très souvent, la surface de l'outil est revêtue ou traitée. Le concept de deuxième corps doit intégrer le caractère composite ou à gradient de composition des parties superficielles des outils.

1.5.3 Corps ③

En coupe, on observe trois grandes familles de troisièmes corps (figures 8 et 9) :

- les dépôts macroscopiques, qui sont constitués de particules issues du corps ① et stabilisées sur le corps ② ;
- les dépôts microscopiques qui peuvent être constitués de particules issues du corps ①, avec ou sans réactivité chimique entre celles-ci et le corps ② ;
- les débris, qui peuvent être des particules abrasives préalablement incluses dans le corps ①, des produits de réaction du corps ① avec l'atmosphère, des morceaux du corps ② arrachés, des morceaux du corps ③ déstabilisés, etc.

Nous allons montrer au paragraphe 2 que :

- les dépôts macroscopiques constitués à température modeste provoquent essentiellement un **endommagement mécanique** (régime vibratoire de travail de l'outil conduisant à fissuration et rupture) ;
- les dépôts microscopiques constitués à température élevée donnent lieu à des altérations de l'outil : **endommagement chimique** ;
- les débris de toute nature sont cause d'une abrasion de la surface des outils : **endommagement physique**.

La figure 9 illustre les trois principaux mécanismes endommageants.

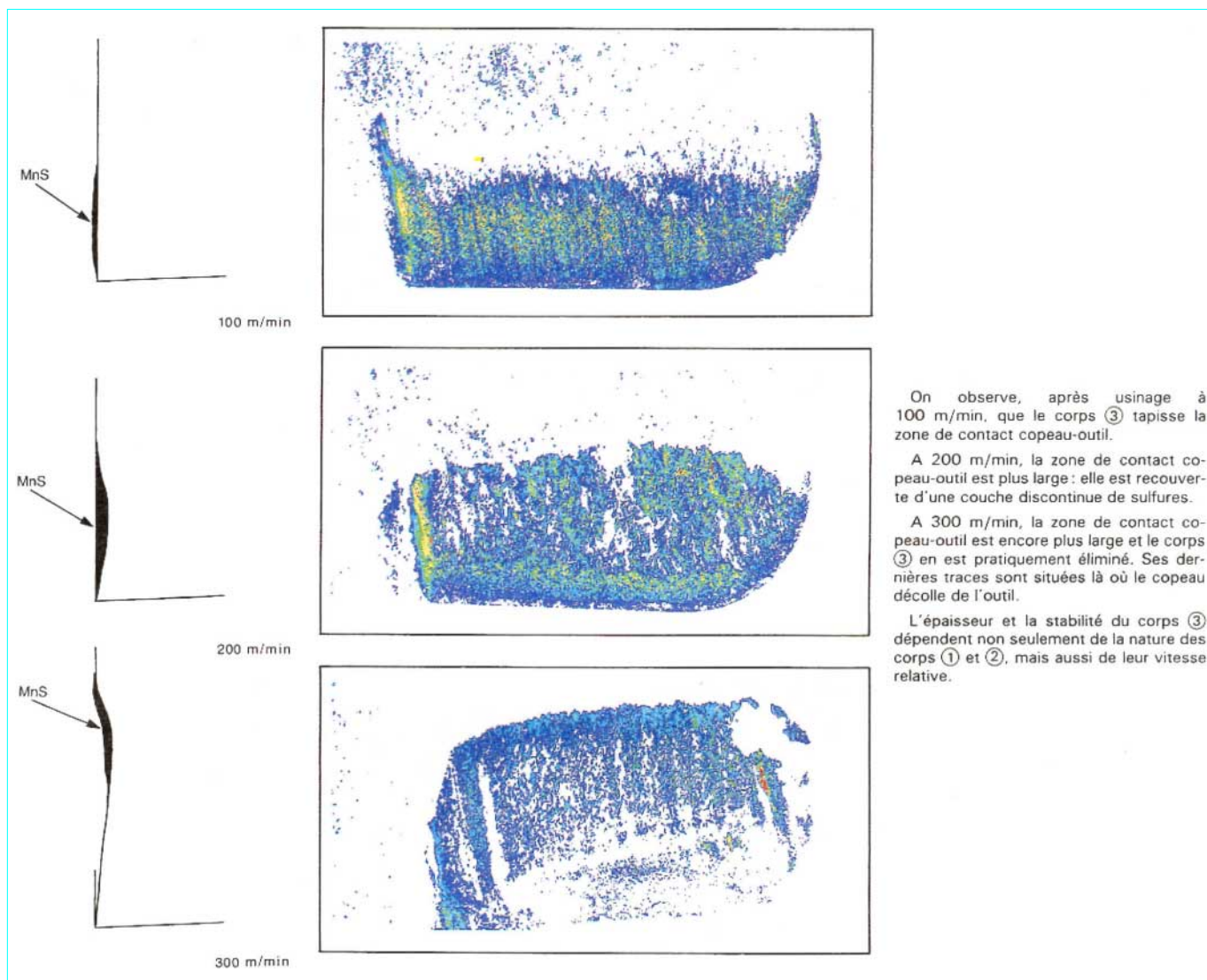


Figure 8 – Corps ③ de type sulfure de manganèse MnS stabilisé sur la face A_γ d'un outil en carbure de tungstène usinant un acier 42CD4

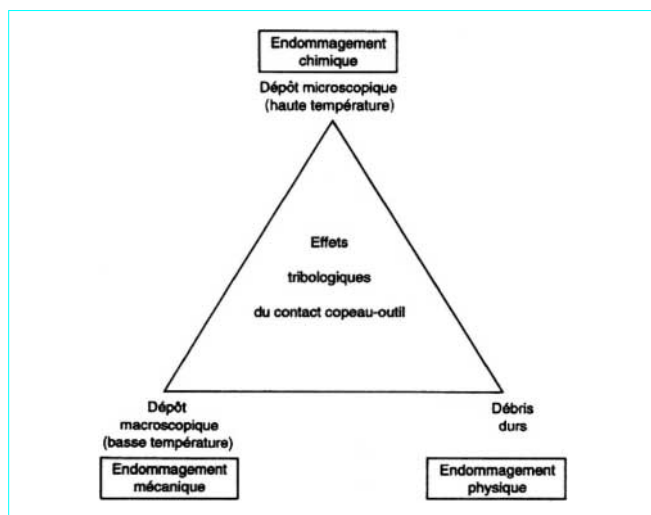


Figure 9 – Mécanismes endommageants des outils de coupe

2. Mécanismes endommageants des outils de coupe

2.1 Endommagement induit par les dépôts macroscopiques

La surface interne du copeau qui frotte sur l'outil est vierge, exempte de tout corps étranger. Il en est très rapidement de même de la surface de l'outil *nettoyée* par le copeau. Les conditions sont donc favorables pour réaliser des soudures par friction après écrasement des aspérités des deux antagonistes, à moins qu'un film lubrifiant ne vienne s'interposer. Compte tenu des pressions de contact et des vitesses relatives effectives, du confinement de la zone de coupe, l'éventualité d'une lubrification externe hydrodynamique est très faible, mais la possibilité d'une autolubrification existe (§ 2.2). Hormis ce cas, les aspérités des deux antagonistes se soudent, mais le défilement du copeau impose de rompre en continu les jonctions qui se forment. Trois cas peuvent se produire.

■ **Premier cas** (d'effet nul en terme d'endommagement) : la plupart des soudures qui se sont constituées n'ont aucune résistance mécanique ; il en est notamment ainsi si une pollution autogénérée est réalisée. Des matériaux tels que les laitons, les aciers, etc. peuvent être élaborés de telle manière qu'ils contiennent des particules métalliques de métaux à bas point de fusion (plomb, bismuth, etc.) qui jouent le rôle de poisons des soudures de contact ; les sulfures peuvent avoir une efficacité équivalente.

■ **Deuxième cas** : les soudures constituées résistent plus que les aspérités des deux antagonistes. La rupture des jonctions conduit à déposer des fragments du matériau le plus doux sur le plus dur. Il y a *transfert* de l'un sur l'autre. Compte tenu de la nature des corps ① et ②, c'est pratiquement toujours sur l'outil que se dépose le corps ③, constitué du corps ① très écroui. Quand la zone de contact C-O est recouverte, des particules du matériau usiné peuvent continuer à se déposer sur lui-même : un dépôt macroscopique se constitue. La géométrie de la zone de coupe évolue (perte d'acuité de l'arête) et un effort plus important doit être appliqué à l'outil pour poursuivre la coupe. Le dépôt atteint une épaisseur et une forme qui dépendent de la rigidité de la liaison outil-pièce et de la résistance au cisaillement du matériau déposé. Dans les cas les plus spectaculaires, un pédoncule se constitue sur l'outil, appelé *arête rapportée* (figure 10).

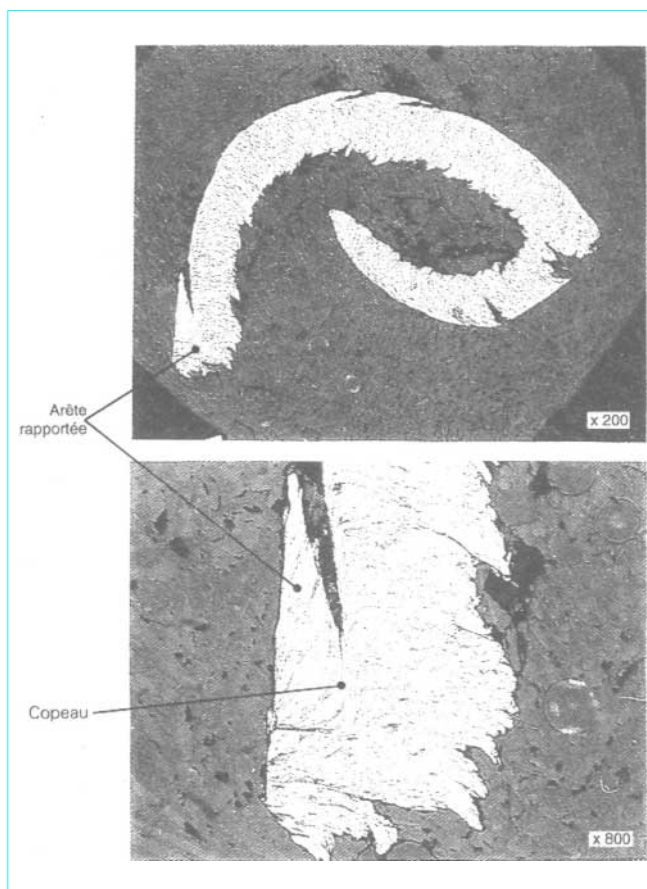


Figure 10 – Arête rapportée restée soudée à un copeau obtenu en brochant un acier XC10 à 10 m/min

La géométrie des dépôts macroscopiques dépend :

- de la dureté, du polyphasage et de l'écrouissabilité à chaud du matériau usiné ; une compétition se produit entre le durcissement qui renforce la résistance des aspérités du copeau et l'adoucissement ;
- de la température dans la ZCS et par conséquent de la vitesse de coupe. En règle générale, pour un couple outil-matériau usiné, le dépôt a un volume qui s'accroît puis décroît, lorsque la vitesse de coupe augmente. Le mécanisme de l'adhésion peut être actif à toute vitesse de coupe, mais ne conduit à des dépôts macroscopiques qu'aux vitesses basses (usinages type brochage) ou moyennes.

Très souvent des morceaux des dépôts macroscopiques sont évacués, ce qui peut entraîner un régime vibratoire : l'outil se cambre, puis se relaxe. On observe une spectaculaire altération (souvent intolérable) de la qualité des surfaces usinées et un endommagement mécanique de l'outil soumis à des surcharges importantes.

■ **Troisième cas** : l'évacuation d'un dépôt macroscopique constitué comme dans le deuxième cas (en particulier d'une arête rapportée très instable en régime vibratoire) se réalise par arrachement (attrition) d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt.

2.2 Endommagement induit par les dépôts microscopiques

Dans les conditions d'usinage à vitesses de coupe élevées (et par conséquent températures élevées dans la ZCS), un dépôt du matériau usiné qui se formerait ne serait pas écroui et n'atteindrait pas une taille capable de modifier les efforts de coupe. Seuls peuvent être obtenus :

- soit des dépôts (corps ③ d'un frottement sec) du matériau usiné ou d'éléments inclus dans le matériau usiné, dont l'ordre de grandeur d'épaisseur est celui de la microgéométrie de l'outil ;
- soit des dépôts un peu plus épais du matériau usiné ou d'éléments inclus dans le matériau usiné, dont la rhéologie à la température du contact copeau-outil rend possible une lubrification hydrodynamique. Dès 1965, Opitz [6] a montré qu'il était possible d'usiner certains aciers sans cratérisation (les outils étaient alors revêtus de couches de silico-aluminates et de sulfures d'épaisseur 50 µm environ). Cette éventualité implique que l'acier contienne des inclusions capables d'assurer l'*autolubrification*, ce qui nécessite des processus d'élaboration très spécifiques.

Dans un cas ou dans l'autre de ces deux types de dépôts qui ne font pas croître les efforts de coupe (et par conséquent ne génèrent pas un endommagement mécanique), deux situations peuvent être rencontrées :

- ou bien ces dépôts sont réactifs avec le matériau de l'outil : ils contribuent alors à un endommagement chimique ;
- ou bien ces dépôts ne sont pas réactifs avec le matériau de l'outil et leurs effets endommageants sont assez modestes : étant non durcis, ils ne sont pas abrasifs. Leur évacuation peut toutefois donner lieu à des arrachements de particules de l'outil (§ 2.1).

Les phénomènes de réactivité chimique sont très fréquents et multifformes. Chaque couple outil-matière usinée est un cas particulier. Trent [8] et Opitz [6] ont été les premiers à mettre en évidence une usure par diffusion des carbures. Maintes solutions ont été trouvées depuis pour réduire la nocivité d'un tel mécanisme. La figure 11, due à G. Bittes [2], illustre le rôle de la stabilité des divers corps ③ possibles sur l'endommagement chimique au cours de l'usinage d'aciers de construction mécanique avec des outils en carbure de tungstène.

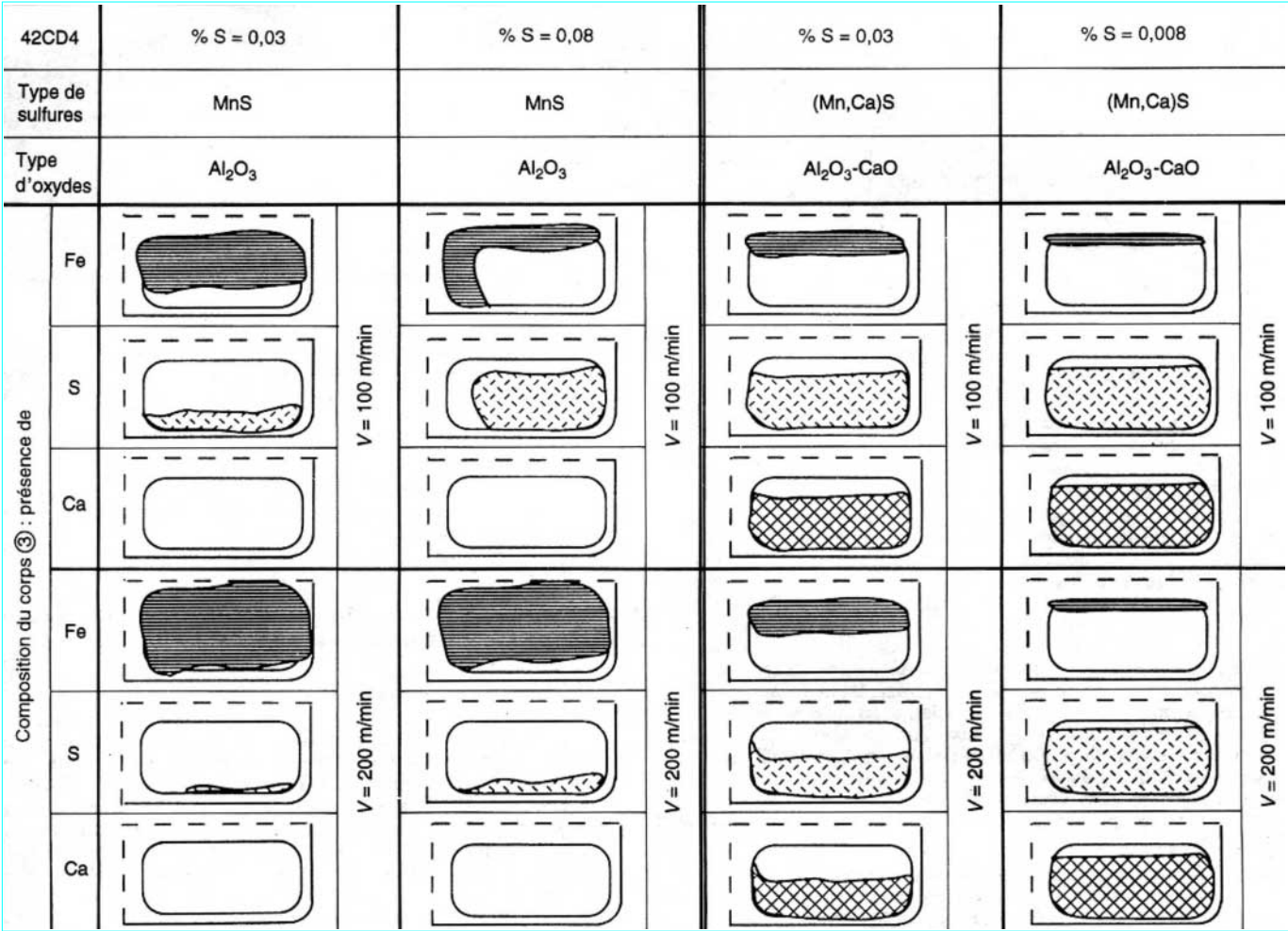


Figure 11 – Composition et aspect du corps ③ déposé sur l'outil usinant quatre aciers 42CD4 ayant deux types de sulfures et deux types d'oxydes

Si l'on examine après usinage la face de coupe d'outils ayant usiné à des vitesses V de 100 à 200 m/min un acier 42CD4 standard (% S = 0,030 sous forme de MnS), on observe la présence d'un dépôt de fer sur toute la surface du cratère. Un examen plus approfondi en coupe permet de voir que ce fer porté à haute température diffuse aux joints des carbures et altère la résistance à l'abrasion de l'outil. Si l'on usine un acier resulfuré (% S = 0,080 sous forme de MnS), on observe un double dépôt de fer et de sulfures. Le fer est dans les zones les plus chaudes du contact copeau-outil : les sulfures de manganèse déposés n'annihilent donc pas les effets du fer.

Si l'on usine un acier contenant des sulfures moins fluides à chaud que le sulfure de manganèse (par exemple enrichis en calcium), on observe un dépôt de sulfures qui interdit tout dépôt de fer et, par conséquent, empêche un endommagement chimique de l'outil. La stabilité de ce dépôt de fer dépend de la teneur en soufre, de la composition des sulfures et de la température dans la ZCS.

Il n'y a pas de réactivité chimique directe entre les outils en céramique et le fer des aciers. Leur usure chimique, mise en évidence par F. Le Maître [3], peut résulter de l'oxydation du dépôt microscopique de fer et de la réactivité de cet oxyde avec la céramique de l'outil. De même, il n'y a pas réactivité chimique directe entre le fer des fontes ou des aciers, et les outils en *sialons* (oxynitride de Si et Al), mais les fortes températures atteintes dans la ZCS lorsque l'on usine de l'acier conduisent à déstabiliser les sialons (qui ne peuvent donc être utilisés pour usiner les aciers), contrairement au cas de la fonte qui s'usine à température plus basse et dont le graphite peut diminuer localement la réactivité de l'atmosphère.

2.3 Endommagement induit par les débris

L'usure abrasive des outils de coupe (deuxième corps) résulte de l'arrachement de petits morceaux par l'impact sur leur surface de particules ayant une dureté équivalente ou supérieure à la leur. Ces *débris* peuvent provenir du matériau usiné, de grains de l'outil arrachés par rupture de microsoudures (§ 2.1), de morceaux d'arêtes rapportées évacués (§ 2.1), de morceaux de l'outil arrachés au moment de l'évacuation de parties de dépôts (phénomène d'attrition, § 2.1), de morceaux de l'outil abrasés par l'impact des autres débris, etc. Il apparaît utile de séparer ce mécanisme de celui décrit au paragraphe 2.2 consacré à la pollution des outils. Bien souvent les mécanismes sont liés et le matériau de l'outil qui est altéré a lui-même une dureté ou une ténacité superficielle qui est amoindrie.

L'abrasion a donné lieu à de nombreuses études [9] [10], notamment consacrées à l'usinage par meulage (rectification, affûtage, etc.). Il peut être commode d'appliquer les principales conclusions de ces travaux d'une part au matériau usinant, d'autre part au matériau usiné.

■ La **nature de l'abrasif** est le premier paramètre à prendre en compte. Si l'on se place du côté de l'outil, l'échelle de résistance à l'abrasion est sensiblement celle de sa dureté à chaud (article *Matériaux pour outils de coupe* [BM 7 080] dans le présent traité), soit dans l'ordre croissant :

- carbure de tungstène ;
- cermet ;
- carbure de titane ;
- alumine ;
- nitrure de bore cubique ;
- diamant.

Cette échelle des matériaux de coupe n'est pas nécessairement le critère essentiel pour sélectionner un outil. En général, plus une nuance a une grande dureté, plus sa ténacité est faible et plus le coût de fabrication de l'outil est élevé.

La dureté à chaud des phases écrouies du matériau usiné détermine, de manière très symétrique, la vitesse d'usure par abrasion des outils. La nature des débris réfractaires inclus dans le matériau usiné peut parfois être contrôlée. À titre d'exemple, on peut citer

le cas des aciers de construction mécanique qui contiennent habituellement des inclusions d'alumine pure Al_2O_3 , parce que leur désoxydation poussée nécessite l'emploi de l'aluminium. Un traitement du métal liquide par du calcium conduit à transformer les aluminates résiduelles en aluminates moins durs, aux formes moins acérées. Un tel traitement n'altère pas les propriétés d'usage de l'acier, mais modifie de manière spectaculaire les lois d'usure des outils. Ainsi un acier 42CD4 classique (désoxydé Al) traité à 300 HB use un outil en carbure de tungstène de classe P30 en 20 min à 115 m/min. En réduisant la seule abrasivité de ses oxydes, la même loi d'usure du même outil est obtenue avec une vitesse de coupe de 150 m/min (gain de productivité de 30 %).

■ La **taille des particules abrasives**, qu'elles proviennent des outils ou des matériaux usinés, est le deuxième paramètre dont dépend la vitesse d'abrasion : celle-ci est d'autant plus faible que les particules abrasives sont plus petites. Le contrôle de la taille des inclusions dures d'un matériau usiné est souvent très déterminant. Il en est en particulier ainsi dans le cas d'usinage de matériaux moulés alliés riches en éléments carburigènes (influence de la taille des carbures dans les fontes).

■ D'autres paramètres peuvent modifier l'endommagement par abrasion. La possibilité d'enrober des inclusions dures dans le matériau usiné par d'autres particules plus molles est utilisée par des aciéristes dans le cas de la fabrication d'aciers resulfurés : la maîtrise du processus d'élaboration peut permettre d'enrober les oxydes par des sulfures et par conséquent de réduire l'efficacité abrasive des oxydes. La quantité de phases dures est également importante, mais ce paramètre est moins discriminant que leur nature et leur taille. Ainsi, il ne serait pas pertinent d'utiliser la teneur en oxygène d'une coulée d'acier pour juger de son usinabilité en condition d'usure abrasive.

3. Méthodes de mesure des endommagements

Réduire l'usure des outils de coupe soit par un choix optimisé des conditions de coupe, soit par la sélection du matériau d'outil le mieux adapté, soit par l'emploi d'un matériau usiné moins endommageant répond à un double souci :

- quantitatif : réduire le coût des pièces usinées ;
- qualitatif : obtenir des surfaces ayant des géométries et microgéométries optimales.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire :

- au minimum de pouvoir faire des bilans, c'est-à-dire de pouvoir mesurer, dans des bonnes conditions de précision et de reproductibilité, les conséquences de toute action concernant le trinôme matière usinée-outil-machine ;
- au mieux d'identifier les mécanismes d'endommagement et d'en déduire des innovations ;
- quelle que soit la voie d'étude retenue, de capitaliser les résultats, de les organiser et de les utiliser en production avec l'assistance de l'outil informatique.

3.1 Méthodes d'examen et d'analyse de la surface des outils et des pièces usinées

Ces méthodes très diverses peuvent être plus ou moins longues, coûteuses, avec des équipements d'ateliers ou de laboratoires très spécialisés. L'examen d'un outil avec une bonne loupe devrait être une pratique courante d'atelier. On peut ainsi assez souvent identifier

le ou les mécanismes endommageants. De même, l'examen sommaire du copeau ne doit pas être négligé : la microgéométrie de la surface qui a glissé sur l'outil, de la surface externe, leur couleur, la dureté du copeau, sa fragilité, son épaisseur (comparée à l'avance) sont autant d'indications quasi gratuites. L'examen de la microgéométrie des surfaces usinées et la comparaison des paramètres de description de celle-ci au profil théorique nécessite des équipements courants de métrologie. Il peut être utile d'identifier aussi l'écrouissage superficiel et de mesurer par rayons X les contraintes résiduelles. La quantification des paramètres macroscopiques d'usure (§ 1.5), tels que le VB sur la face A_α ou le KT sur la face A_γ , peut être faite en atelier avec des équipements d'optique et de métrologie conventionnels.

L'identification de la nature du corps ③ nécessite les équipements lourds d'un laboratoire compétent en matériaux. Les analyses fines (figure 8) doivent être faites avec une microsonde sur des outils peu usés. La microscopie électronique à balayage permet d'examiner des outils très usés.

L'identification du corps ③ n'est pas toujours possible à partir de sa seule composition chimique (d'autant que selon la nature du corps ②, on ne peut pas toujours faire un bilan complet de tous les éléments utiles). Certains auteurs utilisent les rayons X pour avoir une information sur la cristallographie des phases observées.

3.2 Méthodes de mesure des températures de coupe

Les mécanismes très endommageants comme l'usure chimique (par diffusion, par oxydation, etc.) dépendent directement de la température à l'interface copeau-outil : il est donc primordial de pouvoir mesurer celle-ci. On peut distinguer trois familles de méthodes et au moins trois stratégies : faire des mesures directes le plus près possible de la zone du contact C-O, valider une modélisation par un maximum de mesures des conditions thermiques aux limites, faire des mesures indirectes avec un post-chauffage.

3.2.1 Mesures pendant l'usinage

On peut utiliser au moins trois effets physiques : le rayonnement, la conduction et l'effet thermoélectrique.

■ Les **mesures par lunettes pyrométriques** se font soit sur la surface externe du copeau, soit sur la surface de l'outil dégagée pendant un court instant. Ces dernières sont délicates, car prises en des instants très courts. Les premières sont utiles pour ajuster un modèle, mais il est très difficile d'extrapoler les températures internes du copeau à partir de mesures sur sa face externe.

■ Les **mesures par conduction** utilisent des outils instrumentés : un ou plusieurs couples thermoélectriques sont enfoncés dans de très petits trous percés jusqu'au voisinage de la face A_γ . Il faut localiser avec précision la position de leur soudure. L'extrapolation des mesures à la température maximale du contact est d'autant plus imprécise que l'outil est moins conducteur et soumis à un plus fort gradient thermique.

■ Les **mesures par effet thermoélectrique** exploitent le fait que le contact copeau-outil est équivalent à une *soudure chaude*. Si avec les mêmes matériaux on constitue une *soudure froide*, on doit pouvoir mesurer une force électromotrice. Technologiquement ces mesures sont limitées au cas des outils conducteurs et nécessitent beaucoup de précautions. On peut aussi s'interroger sur leur validité, notamment lorsqu'un troisième corps se constitue à partir d'une phase incluse dans le matériau usiné.

3.2.2 Mesures après l'usinage

On utilise le fait que certains outils sont l'objet d'évolutions structurales dans leurs parties portées à haute température. Si l'on sait relier simplement une caractéristique structurale (la taille des grains, par exemple) ou une propriété mécanique (la microdureté, par exemple) à un paramètre d'équivalence temps-température, on doit pouvoir tracer les isothermes des températures atteintes dans l'outil. Ces méthodes, dont Trent [8] le premier a montré la pertinence, sont très longues et ne peuvent s'appliquer qu'à un très petit nombre de matériaux d'outils, notamment les aciers rapides.

Le copeau a lui aussi pu subir des évolutions structurales. Il peut donner des informations sur la température maximale (figure 4) du contact copeau-outil (à condition de connaître les températures auxquelles ont lieu les changements structuraux pour des vitesses de chauffage équivalentes à celles imposées au copeau).

3.2.3 Mesures séquentielles pendant et après l'usinage

On peut utiliser des outils instrumentés avec des couples thermoélectriques pour donner un repère pendant la phase d'usinage, puis réchauffer ensuite l'outil par une source permettant un chauffage localisé (un rayon laser, par exemple). Quand le signal du couple atteint la valeur repère, on mesure avec une lunette pyrométrique la température en surface de l'outil. Cette méthode indirecte donne de bons résultats [1], mais nécessite des équipements complexes.

3.2.4 Exemple de mesure

On a montré sur la figure 11 comment quatre variantes d'aciers 42CD4 de même dureté pouvaient s'usiner avec présence de troisièmes corps de compositions très différentes. Simultanément, les températures de coupe ont été mesurées [1] par trois des techniques décrites ci-dessus :

- mesure avec un thermocouple inséré dans un trou de 0,6 mm de diamètre percé dans une plaquette de coupe en carbure de tungstène. La soudure chaude du thermocouple était à 0,5 mm de la face A_γ ;
- mesure par une lunette pyrométrique infrarouge focalisée sur la pointe de l'outil ;
- mesure indirecte après usinage par post-chauffage laser.

On observe sur le tableau 1 :

- l'écart important des températures entre la surface de l'outil et le point de mesure du thermocouple. L'existence d'un fort gradient de température illustre bien la difficulté technique des mesures par conduction ;
- la bonne concordance entre la méthode pyrométrique directe et la méthode séquentielle avec post-chauffage laser ;
- quelle que soit la méthode de mesure des températures employées, la très grande influence de la métallurgie de chaque variante d'acier sur les températures au contact copeau-outils.

3.3 Méthodes de mesure des efforts et des puissances de coupe

Ces mesures sont nécessaires pour un choix optimisé des conditions de coupe valorisant les puissances installées. Elles sont précieuses pour une description mécanique du système tribologique outil-pièce-copeau.

Tableau 1 – Mesure des températures (en °C), vitesse de coupe : 200 m/min			
Acier	pendant l’essai		après l’essai
	couple (1)	lunette	postchauffage laser
% S = 0,03 oxydes Al ₂ O ₃	806	1 220	1 216
% S = 0,03 oxydes aluminates	517	658	760
% S = 0,08 oxydes Al ₂ O ₃	877	1 131	1 138
% S = 0,08 oxydes aluminates	503	644	716
(1) Couple thermoélectrique à 0,5 mm sous la face A _γ .			

Les mesures de puissance ne posent pas de difficultés particulières tant que les courants et tensions sont sinusoïdaux (ce qui n’est pas toujours le cas, en particulier avec des électrobroches utilisant des variateurs de fréquence).

Les techniques employées pour mesurer les efforts de coupe ne doivent pas modifier la rigidité du contact outil-pièce. L’usage est quasi généralisé de n’utiliser que des capteurs contenant des quartz piézoélectriques qui ont une excellente sensibilité, une très grande rigidité et une fréquence propre très élevée. Pour les signaux correspondant à des opérations de coupe discontinue, il est nécessaire de bien définir une politique d’échantillonnage (combien d’informations veut-on pendant une rotation de l’outil, combien d’informations peut-on stocker, quelle est la fréquence d’acquisition, etc.).

Poste d’essai d’usinabilité instrumenté (figure 12) : un poste d’essai d’usinage, qu’il soit en atelier ou en laboratoire, est choisi avec un très grand soin. La machine-outil utilisée doit être de conception moderne, bien entretenue et utilisée en deça des maxima de sa puissance et de sa vitesse de broche. Des équipements de mesures physiques adaptés doivent y être installés : mesure de puissance, capteur des composantes de l’effort de coupe, éventuellement lunette pyrométrique, accéléromètre, etc. Ces appareils sont reliés à une électronique performante (amplificateurs, filtres). Les mesures sont mémorisées sur ordinateur puis traitées, affichées sur écran et éditées sur table traçante ou imprimante. Un soin tout particulier est apporté à l’archivage des données dont le volume nécessite un stockage approprié, à l’étalonnage des appareils de mesure et à la maintenance de la machine d’essai.

3.4 Lois d’usure d’outil mesurées
par des essais d’usinabilité

Les lois d’usure d’un couple outil-matériau usiné sont des photographies des effets cumulés de tous les endommagements actifs au cours d’une opération d’usinage bien définie. Elles sont déterminées au moyen d’essais qui peuvent se faire en atelier ou en laboratoire [5].

On a vu (§ 1.5) que plusieurs paramètres (usure frontale VB, cratérisation KT, etc.) permettent de suivre globalement l’évolution de la géométrie de l’outil. On peut utiliser des valeurs maximales admissibles de ceux-ci (ou d’autres indicateurs en relation avec la qualité de la surface usinée, par exemple) pour définir de façon conventionnelle la durée de vie *T* d’un outil pour une condition de coupe donnée (c’est-à-dire une valeur *V*, de *f*, un diamètre *d* d’outil ou une profondeur de passe *a*, etc.) et une technologie d’usinage. Pour les usinages discontinus, *T* est le cumul des temps de coupe effectifs et non le temps d’essai. Aussi peut-on substituer à la notion de temps celle de longueur usinée *L*.

Pour un type de machine-outil, la loi d’usure d’un couple outil-matière usinée est de la forme :

$$T = T(V, f, d)$$

ou

$$T = T(V, f, a)$$

ou

$$L = L(V, f, d)$$

Assez souvent la loi d’usure est du type loi généralisée de Taylor :

$$V = K \cdot T^n \cdot f^p \cdot a^q$$

avec *K* coefficient dépendant de la valeur limite du critère géométrique d’usure d’outil. En tournage, on peut montrer que :

$$K = K_0 \cdot VB^m$$

Cinq paramètres sont donc nécessaires pour décrire le système outil/matière usinée/machine-outil. Toutefois *q* est généralement très petit, *m* varie peu d’un matériau usiné à un autre (pour une famille de matériaux). Le plan d’expériences permettant de déterminer les seuls trois paramètres *K*, *n* et *p* reste de taille raisonnable.

Valeurs indicatives des coefficients <i>n</i> , <i>p</i> et <i>q</i> de la loi généralisée de Taylor dans le cas du tournage d’aciers avec des plaquettes de coupe				
Grade de l’outil	Acier	<i>n</i>	<i>p</i>	<i>q</i>
P30 P15 Al ₂ O ₃	XC10	– 0,25	– 0,25	– 0,12
		– 0,36	– 0,22	– 0,12
		– 0,60	– 0,50	– 0,10
P30 P15 Al ₂ O ₃	XC38	– 0,20	– 0,35	– 0,12
		– 0,28	– 0,37	– 0,12
		– 0,52	– 0,50	– 0,10
P30 P15 Al ₂ O ₃	18CD4	– 0,21	– 0,33	– 0,12
		– 0,31	– 0,30	– 0,12
		– 0,57	– 0,50	– 0,10
P30 P15 Al ₂ O ₃	42CD4 (230HB)	– 0,18	– 0,40	– 0,12
		– 0,26	– 0,40	– 0,12
		– 0,48	– 0,50	– 0,10
P30 P15 Al ₂ O ₃	42CD4 (290HB)	– 0,15	– 0,45	– 0,12
		– 0,20	– 0,50	– 0,12
		– 0,38	– 0,50	– 0,10

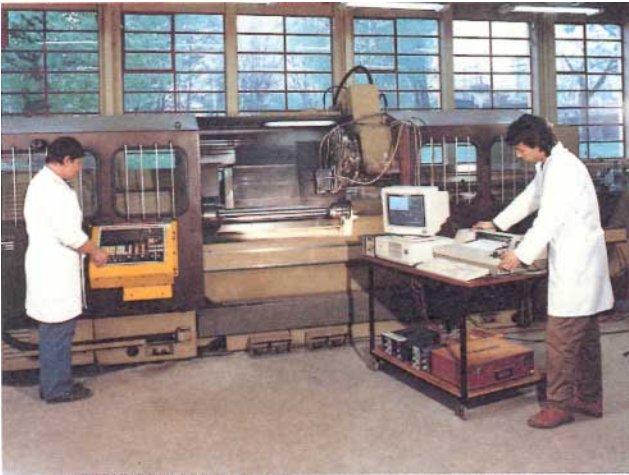


Figure 12 – Poste d'essai d'usinabilité instrumenté

Quand on compare entre eux des matériaux dans des conditions d'essai bien définies, en général on ne fait pas varier l'avance f_0 ni la profondeur de passe a_0 ; on choisit une valeur limite du critère d'usure de l'outil (par exemple VB_0) et le temps T_0 au bout duquel l'outil aura subi cette usure. Chaque matériau est alors caractérisé par la vitesse V_0 correspondante. Des essais conformes à la norme ISO 3685 sont le plus souvent réalisés dans des conditions telles que : $T_0 = 20$ min, $a_0 = 2$ mm, $f_0 = 0,4$ mm/tr et $VB_0 = 0,3$ mm.

Choix des conditions de coupe en tournage
(ISO 3685)

Rayon de bec de l'outil	0,4	0,8	0,8	1,2
Avance f_0(mm/tr)	< 0,32	< 0,64	< 0,64	< 0,95
Profondeur de passe a_0 (mm)	> 0,8 < 10 f_0	> 1,6 < 10 f_0	> 1,6 < 10 f_0	> 2,4 < 10 f_0

On utilise fréquemment des notations indicées du type $V_{20, VB0, 4}$ pour préciser dans quelles conditions la vitesse de référence V_0 est mesurée.

Si l'on considère à nouveau le cas des quatre nuances d'aciers 42CD4 ayant même dureté, dont les corps ③ ont été décrits sur la figure 11 et dont les températures de coupe mesurées sont notées au paragraphe 3.2.4, on constate que les vitesses V_0 mesurées en usinant ces nuances avec des outils en carbure de tungstène de grade P40 sont très différentes :

Acier	% S = 0,03 oxydes Al_2O_3	% S = 0,03 oxydes aluminates
$V_0 = V_{20, VB0, 4}$ (m/min)	105	145
Acier	% S = 0,08 oxydes Al_2O_3	% S = 0,08 oxydes aluminates
$V_0 = V_{20, VB0, 4}$ (m/min)	140	195

Du contrôle du corps ③ peuvent résulter des gains de productivité considérables.

Critères d'usure d'outil utilisés pour arrêter un essai (norme ISO 3685) : il convient de se rapporter à la norme qui définit les divers critères d'usure qui peuvent être choisis, leurs valeurs maximales prises en compte pour arrêter un essai et surtout les précautions à prendre pour faire les mesures.

Les valeurs ci-dessous situent les valeurs maximales des critères le plus souvent pris en compte.

- Outil en acier rapide :
 $VB_0 = 0,3$ mm
pas de critère de cratérisation
- Outil en carbure :
 $VB_0 = 0,3$ mm
 $KT_0 = 0,06 + 0,3 f_0$ (en mm)
- Outil en céramique :
 $VB_0 = 0,3$ mm
pas de critère de cratérisation

4. Choix assisté par ordinateur des conditions de coupe

Tous les efforts de compréhension des mécanismes endommageants des outils de coupe contribuent aux progrès des matériaux d'outils et des matériaux usinés. Ils doivent aussi permettre un choix optimisé des conditions d'utilisation des outils. Pendant très longtemps l'homme de l'art a choisi ses paramètres de coupe par *expérience*. Une approche très rigoureuse est devenue nécessaire.

Des outils modernes tels que les nitrures de bore cubiques CBN coûtent environ 10 fois plus cher que des plaquettes en carbure revêtues de nitrure de titane ; utilisés à de très grandes vitesses de coupe [7], ils réduisent cependant le coût des pièces.

Une assistance par ordinateur au choix des paramètres de coupe est très souhaitable, car il faut prendre en compte [4] non seulement le couple outil-matière usinée, mais aussi les particularités de la machine-outil, des outillages et de la géométrie de la pièce usinée. Il existe sur le marché divers logiciels. Tous ont besoin de bases de données très riches. Le travail pour compléter celles qui existent reste énorme. Si des normes existaient en plus grand nombre pour codifier les méthodologies de quantification des endommagements telles que décrites au paragraphe 3, les bases existantes ou en cours de création seraient cohérentes et, par conséquent, additives.

5. Conclusion

Pour accroître la productivité des ateliers d'usinage, la contribution de tous est nécessaire : celle des spécialistes de la machine-outil, celle des mécaniciens de l'outillage, celle des chimistes dont dépend la performance des fluides de coupe, etc. Pendant longtemps les apports des spécialistes des matériaux qui coupent et des matériaux usinés ont été autonomes entre eux et *a fortiori* indépendants de ceux des autres disciplines. Une démarche globalisante est en train de naître, qui part de l'analyse des phénomènes de contact entre outil, pièce et copeau et prend en compte non seulement les propriétés intrinsèques respectives des trois antagonistes, mais aussi leurs interactions réciproques et celles avec le système mécanique dans lequel ils s'insèrent.

Endommagement des outils de coupe

par **François LEROY**

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

Références bibliographiques

- [1] BITTES (G.). – *Mesure de température à l'interface outil-copeau* (1993).
- [2] BITTES (G.). – Thèse. Université de Toulon et du Var (1993).
- [3] LE MAÎTRE (F.) et HAN (K.L.). – *Contribution à l'étude de l'usure d'outils céramiques*. Colloque international sur la coupe des matériaux, Cercle d'étude des Métaux (1990).
- [4] LEROY (F.). – *Mise en forme par usinage*. Les référentiels Dunod : Pratique des matériaux industriels (1990).
- [5] LEROY (F.). – *Les essais d'usinabilité et de formabilité des aciers*. Internationaux de France du traitement thermique (1990).
- [6] OPITZ (H.) et KONIG (W.). – *Basic research on the wear carbide cutting tools machinability*. Proceedings of ISI, Londres (1965).
- [7] SCHULZ (H.). – *Hochgeschwindigkeitsfräsen metallischer und nicht metallischer Werkstoffe* (Fraisage à grande vitesse des produits métalliques et non métalliques). Carl Hanser Verlag, Munich, Vienne (1989).
- [8] TRENT (E.M.). – *Metal cutting*. Butterworths, Londres (1977).
- [9] KRAMER (B.M.). – *A comprehensive tool wear model*. Annals of CIRP, vol. 35/1, p. 67 (1986).
- [10] MAGNEE (A.). – *Mécanismes de l'endommagement par abrasion*. Chapitre 9/5/1. Les référentiels Dunod : Pratique des matériaux industriels (1992).
- [11] YAO (Y.) et al. – *On-line estimation of groove wear in the minor cutting edge for finish machining*. Annals of CIRP, vol. 40/1, p. 41 (1991).
- [12] Dictionnaire du collège international pour l'étude scientifique des techniques de production mécanique. CIRP.

Normalisation

International Organization for Standardization ISO.

3002/1	1982	Définitions de base pour la coupe et la rectification. Partie 1 : Géométrie de la partie active des outils coupants. Notions générales, système de référence, angles de l'outil et angles de travail. Brise-copeaux.	3002/3	1984	Grandeurs de base en usinage et rectification. Partie 3 : Grandeurs géométriques et cinématiques en usinage.
3002/2	1982	Définitions de base pour la coupe et la rectification. Partie 2 : Géométrie de la partie active des outils coupants. Formules de conversion générales liant les angles de l'outil en main et les angles en travail.	3002/4	1984	Grandeurs de base en usinage et rectification. Partie 4 : Force, énergie et puissance.
			3002/5	1989	Grandeurs de base en usinage et rectification. Partie 5 : Terminologie de base propre au meulage.
			3685	1992	Essais de durée de vie des outils de tournage à partie active unique.
			8688	1989	Essais de durée de vie des outils de fraisage.