

Fluides de coupe

Rôle en usinage et classification

par **Benoît BROQUERIE**
Ingénieur d'application, JP Industrie (Shell)

1. Opérations d'usinage par enlèvement de matière.....	BM 7 064 - 2
1.1 Définition et principes	— 2
1.2 Matériaux usinés	— 5
1.2.1 Classification	— 5
1.2.2 Désignation par symboles	— 5
1.2.3 Classification des matériaux par degré d'usinabilité.....	— 5
1.3 Outils de coupe	— 5
1.3.1 Matériaux utilisés	— 5
1.3.2 Influence de la température.....	— 6
1.4 Fluides de coupe.....	— 6
1.4.1 Rôle des fluides de coupe	— 6
1.4.2 Classification	— 7
2. Conception des lubrifiants réfrigérants (LR).....	— 8
2.1 Classification des lubrifiants réfrigérants	— 8
2.2 Évolution des lubrifiants réfrigérants miscibles à l'eau au cours du temps	— 8
2.3 Conception et stabilité des lubrifiants réfrigérants miscibles à l'eau	— 9
2.3.1 Composition du concentré.....	— 9
2.3.2 Système d'émulgateurs	— 9
2.4 Additifs anti-usures	— 11
2.4.1 Additifs polaires.....	— 12
2.4.2 Additifs EP (extrême pression)	— 12
3. Conclusion	— 12
Références bibliographiques	— 13

Les études de Taylor, vers 1883, sur l'organisation du travail et la coupe des métaux font, les premières, état de l'utilisation de l'eau de savon pour l'arrosage des pièces en cours d'usinage. Les vitesses de coupe augmentaient, de ce fait, de 30 à 40 % et l'on pouvait espacer l'affûtage des outils.

L'eau de savon remplissait bien les deux fonctions essentielles exigées d'un liquide de coupe aujourd'hui :

— **refroidissement** de l'outil et de la pièce grâce à la capacité thermique massique élevée de l'eau ;

— **lubrification** de la coupe, grâce à la teneur en corps gras du savon.

En outre, l'eau de savon était plus « mouillante » que l'eau pure, mais elle ne permettait pas d'éviter la corrosion et tachait les pièces et les machines.

L'eau de savon fut remplacée par des huiles végétales ou animales, puis par des émulsions d'huiles minérales et, enfin, par des mélanges d'huiles minérales et de matières grasses dans lesquels on ajouta des additifs pour leur conférer des qualités supplémentaires.

La technique de distribution des huiles de coupe se modifia. Un bac central dans chaque atelier permit de distribuer le liquide aux diverses machines.

Les liquides d'arrosage furent désignés sous le nom **d'huiles de coupe** car, solubles ou non, ces liquides comportaient toujours des huiles et, le plus souvent, un pourcentage important d'huiles minérales.

Un nouveau pas fut franchi quand on trouva, sur le marché, des liquides de coupe qui ne contenaient plus d'huile d'aucune sorte.

C'est pourquoi nous utiliserons souvent le terme **liquides de coupe**, plus général que le terme huiles de coupe, dans la suite de cet exposé.

Les nouveaux liquides de coupe sont désignés sous les noms de liquides chimiques ou synthétiques et, bien qu'étant loin de détrôner les huiles de coupe, leur tonnage distribué croît régulièrement chaque année.

Nous ne pourrons donner de formules précises d'huiles de coupe, chaque fabricant conservant les siennes.

Nous nous bornerons à indiquer les grandes classes de ces produits et leurs constituants essentiels, puis à préciser les divers points de leur mise en œuvre : conception, manipulation, maintenance face aux micro-organismes, essai, toxicologie et élimination des liquides de coupe.

Cet exposé se compose de deux parties :

[BM 7 064] Fluides de coupe. Rôle en usinage et classification

[BM 7 065] Fluides de coupe. Mise en œuvre et traitement des rejets

1. Opérations d'usinage par enlèvement de matière

Le travail des métaux se fait, aujourd'hui, par :

- fonderie : réalisation de pièces par coulée de métal en fusion dans un moule en sable ou métallique ;
- forgeage : confection de pièces par déformation à chaud du métal ;
- tournage, décolletage, fraisage, brochage, taillage, perçage, etc. : obtention de pièces par enlèvement de copeaux ;
- emboutissage, découpage, estampage, tréfilage : confection de pièces par déformation à froid ;
- rectification au moyen de meules ;
- électroérosion : enlèvement de matière au moyen d'une étincelle électrique entre la pièce à modeler et une électrode mère épousant la forme de la découpe ou déroutage au fil ;
- usinage au laser : apparition récente pour certaines opérations particulières ;
- frittage : moulage de poudre sous forte pression et haute température, permettant la constitution d'alliages impossibles à obtenir par fusion.

Nous nous bornerons à étudier, dans la suite de cet article, les principaux procédés d'usinage par enlèvement de matière.

Pour de plus amples renseignements, le lecteur se reportera aux articles spécialisés de ce traité, rubrique Usinage [2].

1.1 Définition et principes

■ Alésage

L'alésage est une régularisation très précise du diamètre intérieur d'un cylindre ou d'un trou. Cette opération se fait sur une aléuseuse au moyen d'un outil-couteau ou d'un alésoir (figure 1).

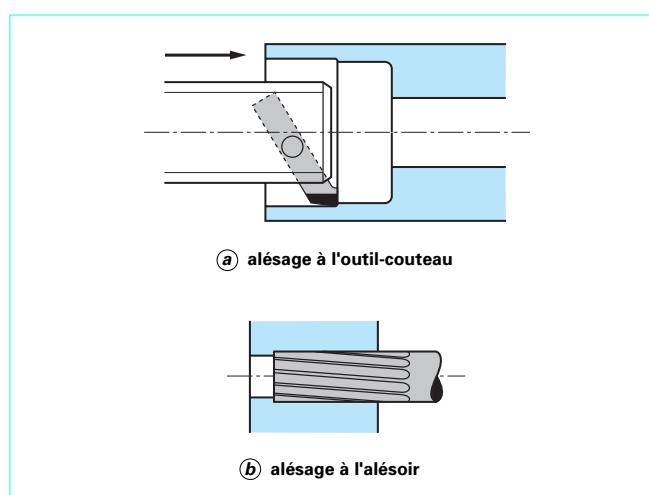


Figure 1 – Opération d'alésage

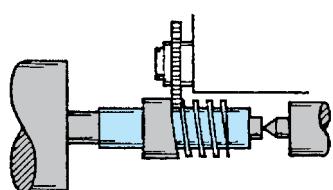
■ Décolletage

Le décolletage est la fabrication de pièces diverses, généralement simples (vis, boulons, axes, etc.) obtenues sur un tour en les usinant directement les unes après les autres dans une barre de métal. Les outils utilisés sont soit en acier rapide, soit en carbure, matériau de plus en plus utilisé.

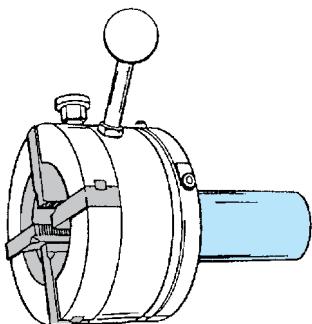
Le décolletage comprend généralement plusieurs opérations d'usinage.

■ Filetage

Le filetage est une opération d'usinage consistant à creuser une rainure hélicoïdale, appelée filet, le long d'une surface cylindrique. Cette surface peut être une barre ou la surface extérieure d'un tube (figure 2).



(a) filetage à l'outil-couteau



(b) filetage au peigne

Figure 2 – Opération de filetage

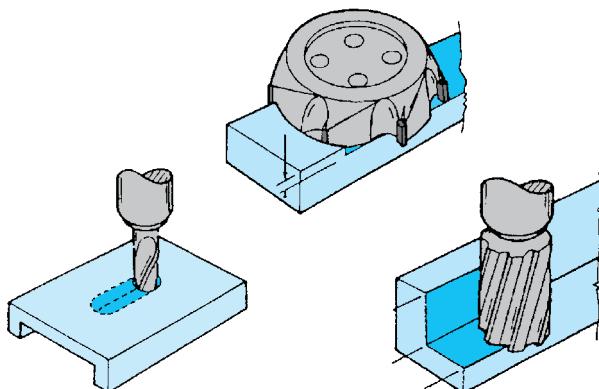


Figure 3 – Divers types d'opérations de fraisage

Fraisage

C'est l'opération d'usinage consistant à enlever du métal au moyen d'un outil rotatif comportant des arêtes tranchantes appelé fraise et déterminant la forme de la découpe (figure 3).

Perçage ou forage

C'est l'opération qui consiste à forer un trou dans une pièce métallique au moyen d'un foret. Les forets utilisés pour le forage profond sont généralement munis d'un conduit interne amenant l'huile de coupe à la pointe de l'outil. Ce système est appelé « arrosage par le centre » (figure 4).

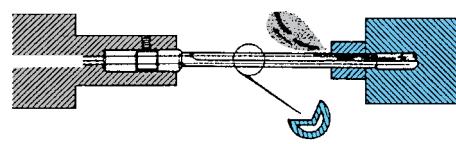


Figure 4 – Opération de perçage ou forage

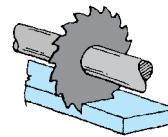


Figure 5 – Opération de sciage ou de tronçonnage

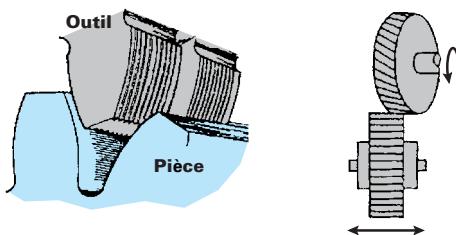


Figure 6 – Opération de shaving

Sciage ou tronçonnage

Le sciage est l'opération d'usinage ayant pour but de sectionner une pièce de métal au moyen d'une scie. Celle-ci peut avoir la forme d'un disque, d'un ruban ou d'une lame (figure 5).

Shaving

C'est l'opération de finition de pièces mécaniques pour lesquelles une très grande précision d'ajustage est demandée. L'outil a l'aspect d'un engrenage ou d'une crémaillère dont les dents sont très petites et très coupantes (figure 6). Par sa rotation, l'outil entraîne la pièce à usiner. Du fait de l'angle formé par les axes de l'outil et de la pièce, il y a enlèvement par abrasion sur la pièce à usiner.

Brochage

Le brochage est une opération d'usinage qui allie la précision à un bon fini des pièces usinées. La cote et un bon état de surface sont obtenus beaucoup plus rapidement que par toute autre opération connue. L'outil est constitué d'un grand nombre de dents de petite dimension qui enlèvent chacune une quantité prédéterminée de métal et ne sont en contact avec la pièce que pendant un très bref instant.

Taillage

Le taillage a pour but la fabrication des engrenages, soit à la fraise-mère, soit à l'outil-couteau (figure 7).

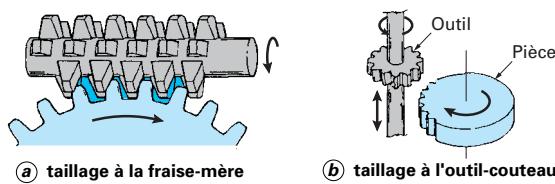


Figure 7 – Opération de taillage

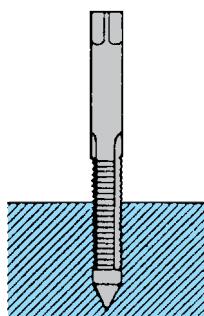


Figure 8 – Opération de taraudage

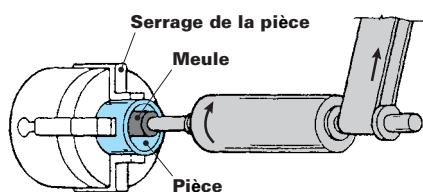


Figure 9 – Rectification interne

Taraudage

C'est l'opération consistant à creuser une rainure hélicoïdale appelée filet, dans la face interne d'un trou ou d'un tube cylindriques (figure 8).

Rectification

• Qu'est-ce que la rectification ?

La rectification est un usinage par abrasion. La matière se désagrège en très petits copeaux par l'action de grains durs et anguleux. Ces grains abrasifs sont réunis les uns aux autres par un agglomérant pour former un solide de révolution désigné sous le nom de meule.

On distingue généralement plusieurs types de rectification :

- la rectification plane ;
- la rectification cylindrique ;
- la rectification sans centre ou « centerless » ;
- la rectification de filet ;
- la rectification interne (de cylindres) (figure 9).

• Caractéristiques d'une meule

Les caractéristiques qui définissent une meule sont :

- sa forme ;
- ses dimensions ;
- sa constitution.

Une meule est composée de deux constituants principaux :

- les grains d'abrasifs qui jouent le rôle d'outils coupants ;
- le liant qui sert à les agglomérer.

• Les grains d'abrasifs

On distingue deux catégories de grains :

- les abrasifs dits conventionnels (alumine et carbure de silicium) ;
- les abrasifs ultradurs tels que le nitrite de bore et le diamant.

Un grain d'abrasif se définit par de nombreux paramètres. Parmi ceux-ci on peut citer la forme, la rugosité, la structure cristalline, la conductivité thermique et la dureté.

• Le liant

C'est la matière qui permet l'agglomération des grains de la meule. Deux propriétés essentielles de la meule dépendent du liant choisi : la force de rétention des grains actifs et la rigidité du corps de la meule. On dénombre un certain nombre de liants, parmi lesquels on peut citer :

- les liants céramiques ou vitrifiés employés pour presque toutes les meules de rectification, notamment pour les meules classiques à base d'alumine et à grains en carbure de silicium ;

— les liants résinoïdes utilisés pour les meules au diamant et les meules au nitrite de bore cubique ;

— les liants en caoutchouc à base de caoutchouc naturel. Ils donnent des corps de meules souples. Les applications sont limitées, entre autres, aux meules pour la rectification à grande vitesse de gorges de roulement et pour les finitions ;

— les liants en gomme-laque employés pour la fabrication de meules minces de tronçonnage et de meules destinées au polissage ;

— les liants métalliques à grande résistance mécanique utilisés pour les abrasifs les plus durs de type diamant et nitrite de bore ;

— les liants à base de magnésie à résistance mécanique relativement faible ;

— les liants silicates utilisés pour les meules effectuant des travaux de surfacage ou d'affûtage à grande surface de contact.

• Codification utilisée

La codification utilisée pour les liants et les grains d'abrasifs est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1 – Codification des divers constituants d'une meule

Abréviations utilisées pour les liants

V	Vitrifié	BF	Résine synthétique avec armature
S	Silicate	E	Gomme laque
R	Caoutchouc	Mg	Magnésie
RF	Caoutchouc avec armature	M	Métallique
B	Résine synthétique		

Symbolique utilisée pour les grains d'abrasifs

◆	Corindon/Alumine
▼	Carbure de silicium
*	Nitrite de bore cubique
❖	Diamant synthétique ou naturel

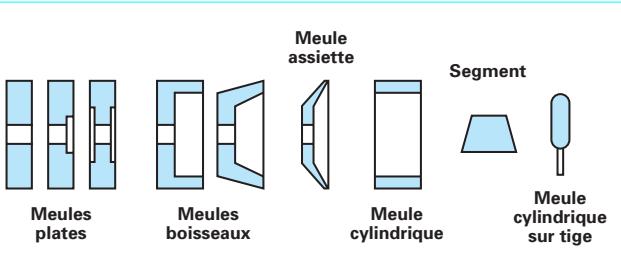


Figure 10 – Différents types de meules utilisés en rectification

● Différents types de meules

Les différents types de meules sont rassemblés (figure 10).

■ Classification des opérations d'usinage par enlèvement de matière

Les différentes opérations d'usinage que nous venons de mentionner sont classées ci-dessous par ordre de difficulté croissante : sciage < tournage < fraisage < taillage d'engrenage par fraise-mère < décolletage < forage profond < alésage < rectification < taillage d'engrenage à outil < shaving < filetage-taraudage < brochage.

1.2 Matériaux usinés

Les matériaux usinés sont nombreux et peuvent être classés en deux grandes familles :

- les métaux non ferreux ;
- les métaux ferreux.

1.2.1 Classification

■ Métaux non ferreux

Comme le nom l'indique, cette famille englobe tous les métaux et leurs alliages dont la base n'est pas le fer.

Les plus courants sont :

- le cuivre et ses alliages tels que le laiton et le bronze ;
- l'aluminium et ses alliages ;
- le magnésium.

■ Métaux ferreux

Cette famille comprend tous les alliages ayant pour constituant principal le fer.

● **Les aciers non alliés** sont ceux dont les teneurs en éléments d'alliages ne dépassent pas certaines valeurs limites.

Exemple : aluminium < 0,1 % ;
bore < 0,000 8 % ;
chrome < 0,30 % ;
cobalt < 0,1 % ;
cuivre < 0,4 %.

● **Les aciers alliés** (ou faiblement alliés) sont ceux pour lesquels au moins une des valeurs limites des éléments d'alliage est atteinte.

● **Les aciers spéciaux** (ou fortement alliés) comprennent toutes les autres qualités d'acier telles que les aciers inoxydables, etc.

● **Les fontes** existent en plusieurs types se différenciant surtout par la teneur en carbone et en éléments d'alliages. Elles contiennent de 2,3 à 4,5 % de carbone.

1.2.2 Désignation par symboles

Les différentes nuances d'acier sont représentées par un ensemble de chiffres et de lettres définissant leur composition et leurs utilisations possibles.

Exemple : acier 2Cr22 = acier au carbone contenant en moyenne 0,1 % de carbone

— acier X12CrNi18-10 = acier spécial (X) contenant 0,12 % de carbone, 18 % de chrome et 10 % de nickel.

Les symboles utilisés dans la norme NF EN 10020 sont les symboles chimiques des éléments constitutifs.

1.2.3 Classification des matériaux par degré d'usinabilité

Le classement suivant indique le degré d'usinabilité des principaux matériaux par ordre de difficulté croissante :

alliages de magnésium < laiton au plomb < fonte d'aluminium < alliage de zinc < bronze au plomb < laiton sans plomb < aluminium commercial < aciers de décolletage < aciers à bas taux de carbone < aciers à taux moyen de carbone < fontes malléables < fontes grises < cuivre < bronze au manganèse < fonte alliée < aciers forgés < aciers durs et extra-durs < monel < aciers à outils < aciers inoxydables < nickel < aciers réfractaires < alliages de titane.

Le comportement en usinage de quelques grandes familles est étudié tableau 2.

1.3 Outils de coupe

1.3.1 Matériaux utilisés

■ Aciers rapides

Le choix d'un acier rapide est fonction de nombreux paramètres tels que la tenue à chaud, la résistance à l'écaillage et à l'usure. Ils contiennent :

- plus de 0,7 % de carbone ;
- environ 4 % de chrome ;
- des proportions variables de tungstène, de molybdène et de vanadium ;
- parfois du cobalt.

Leur composition est symbolisée par une désignation abrégée reprenant :

- pour les aciers sans cobalt, respectivement les teneurs moyennes en W, Mo, V ;
- pour les aciers au cobalt, les teneurs moyennes en W, Mo, V, Co.

Exemples :

acier rapide 18-0-1 : W : 18 % ; Mo : 0 % ; V : 1 % ;
acier rapide 6-5-2-5 : W : 6 % ; Mo : 5 % ; V : 2 % ; Co : 5 %.

■ Carbures métalliques

Les carbures métalliques sont des matériaux frittés constitués de particules très dures de carbure de tungstène, de titane, de tantalum..., et d'un liant, le cobalt.

Ils sont définis par une lettre symbolisant le groupe auquel ils appartiennent et un nombre désignant le domaine d'application.

■ Carbures revêtus

Les revêtements de carbure, nitrule ou carbonitrule de titane sur des carbures de tungstène permettent d'obtenir des plaquettes de bonne ténacité, de résistance à l'usure élevée, couvrant une large gamme d'utilisation.

■ Carbures de titane massifs

Ce type de matériau donne d'excellents résultats en fraisage d'acières au carbone ou alliés.

■ Céramiques

Ces matériaux sont composés d'oxydes durs (alumine, oxyde de chrome...) et parfois de carbures ou de métaux. Leurs principales caractéristiques sont leur tenue à chaud et une excellente dureté. Leur faible résistance aux chocs mécanique ou thermiques limite leur utilisation.

Tableau 2 – Comportement en usinage de quelques grandes familles de matériaux

Matériaux		Comportement en usinage	État de surface
Classe	Nuance		
Aciers au carbone	2Cr22	Matériau collant Copeaux longs	Moyen
	2Cr35	Usinage facile	Bon
Aciers faiblement alliés	35CrMo4	Bonne usinabilité, variable suivant la dureté et le traitement thermique	Bon
Aciers inoxydables martensitiques	X12Cr13	Bonne usinabilité dans l'état traité Collant dans l'état recuit	Bon à moyen
	X30Cr13	Abrasif	Bon à moyen
Aciers inoxydables ferritiques	X6Cr17	Matériau collant Copeaux longs	Moyen
Aciers inoxydables austénitiques	X12CrNi18-10	Matériau écrouissable et collant Copeaux longs et durs	Moyen
Molybdène		Matériau abrasif	Bon
Tantale		Matériau collant	Bon
Titane	Non allié	Réactif aux outils	Très bon
	TA6V	Réactif aux outils	Très bon
	TV13C11A3	Réactif aux outils	Très bon
Tungstène	Forgé	Réactif aux outils	Bon
	Coulé	Réactif aux outils	Moyen
Zinc		Usinage facile	Très bon
Réfractaires base Ni/Co	Monel 501	Matériau écrouissable et fibreux	Bon
	Inconel 600		Bon
	Hastelloy B		Bon
	Superalliage		Bon
Aluminium et alliages d'aluminium	Aluminium pur à l'état recuit A4-0	Matériau collant	Bon
	Aluminium pur à l'état écroui A4-H12	Usinage facile parfois collant	Très bon
	AlCu4MgTi4	Usinage facile	Très bon
Alliages cuivreux	CuZn 36	Matériau collant-fibreux	Bon
	CuSn 6	Copeaux longs et durs	Très bon
	CuSn 15	Copeaux courts, bonne usinabilité	Très bon
Magnésium	G-A6Z1 G-A9Z1	Usinage facile	Très bon

1.3.2 Influence de la température

La température a une influence sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe (figure 11), ce qui peut avoir une grande importance lors de l'usinage (figure 12).

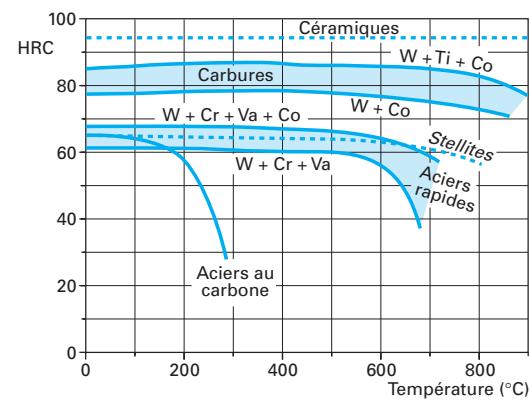


Figure 11 – Influence de la température sur la dureté des outils

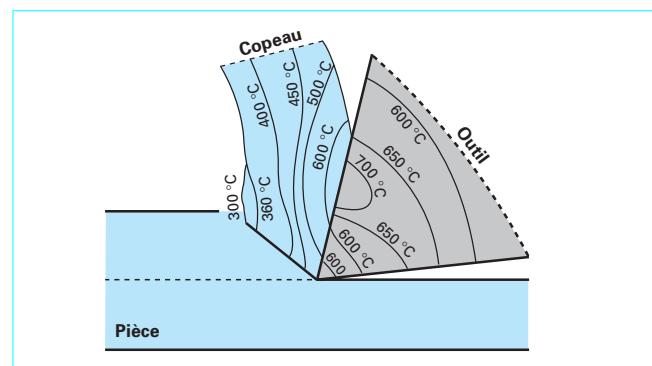


Figure 12 – Exemple de répartition des températures en cours d'usinage dans un acier (SAE 1095) [1]

1.4 Fluides de coupe

1.4.1 Rôle des fluides de coupe

Les trois fonctions principales d'un fluide de coupe sont :

- de réduire le coefficient de frottement pièce/outil ;
- d'éviter la formation de l'arête rapportée ;
- d'évacuer la chaleur dégagée.

D'autres fonctions auxiliaires sont à rattacher aux trois premières :

- le pouvoir anticorrosif pour les machines et les pièces pendant le stockage ;
- l'évacuation des copeaux.

■ Réduction du coefficient de frottement

Une opération d'usinage nécessite le contact entre la pièce et l'outil. Le fluide de coupe contribuera à une lubrification mixte (bon équilibre lubrifiant/refroidissement) ou limite (déséquilibre du rapport lubrifiant/refroidissement) suivant les pressions qui sont exercées.

■ Pas de formation d'arête rapportée

La formation d'arête rapportée peut se résumer de la façon suivante :

- l'opération de coupe engendre le contact outil/pièce ;
- ce contact provoque une élévation de la température (cf. figure 12) et une résistance mécanique élevée ;

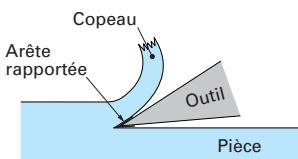


Figure 13 – Formation d'arête rapportée

- la conjonction de ces deux phénomènes (température et charge) conduit à un ramollissement du métal avec, pour conséquence, le collage des surfaces ;
- des particules métalliques sont arrachées de la pièce et se soudent au métal de l'outil ;
- il en résulte une formation d'amas métallique sur l'arête de l'outil (figure 13) et un mauvais état de surface de la pièce.

Les conséquences principales de l'arête rapportée sont une diminution de l'arrivée d'huile au point de contact outil/pièce et un mauvais état de surface.

■ Évacuation de la chaleur dégagée

Comme nous l'avons vu plus haut, le contact outil/pièce/copeaux engendre un dégagement de chaleur important. Le lubrifiant devra donc évacuer ces calories, c'est-à-dire qu'il devra être :

- très mouillant ;
- le plus fluide possible ;
- avoir un débit suffisant.

Dans ce domaine, les fluides aqueux ont un très net avantage sur les huiles entières, la conductivité thermique de l'eau étant quatre fois plus élevée que celle de l'huile minérale :

- capacité thermique massique :

huile minérale	: $1,9 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
eau	: $4,2 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- conductivité thermique :

huile minérale	: $0,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
eau	: $0,58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

1.4.2 Classification

Bien qu'il n'existe pas de classification officielle comme pour les huiles hydrauliques ou les huiles pour moteurs, plusieurs tentatives de classification des lubrifiants pour le travail des métaux ont été entreprises.

La dernière a été proposée par l'ISO (International Organization for Standardization) et semble rencontrer l'adhésion de la majorité des membres. Elle sera donc probablement adoptée comme classification officielle (tableaux 3 et 4).

Tableau 3 – Classification ISO des fluides aqueux pour le travail des métaux

MAA	Émulsions
MAB	Émulsions avec propriétés de réduction de friction
MAC	Émulsions avec propriétés extrême pression (EP)
MAD	Émulsions avec propriétés de réduction de friction et propriétés EP
MAE	Microémulsions
MAF	Microémulsions avec propriétés de friction et/ou propriétés EP
MAG	Solutions
MAH	Solutions avec propriétés de réduction et/ou propriétés EP

Tableau 4 – Utilisation des fluides de coupe (famille M) pour le travail des métaux selon norme ISO/DIS 6743/7

Application particulière	Application plus spécifique	Type de produits et/ou exigences d'utilisation	Code ISO L (1)	Remarques
Enlèvement de matière par coupe, abrasion et formage des métaux par découpage, emboutissage, étrlage de parois, fluotournage, tréfilage, forgeage à chaud et à froid, filage, estampage, laminage à chaud et à froid	Opérations nécessitant des propriétés réfrigérantes prépondérantes	Concentrats donnant, en mélange avec l'eau, des émulsions laiteuses possédant des propriétés d'anticorrosion	MAA	
		Concentrats du type MAA possédant des propriétés de réduction de frottement	MAB	
		Concentrats du type MAA possédant des propriétés « extrême pression » (EP)	MAC	
		Concentrats du type MAF possédant des propriétés « extrême pression » (EP)	MAD	
		Concentrats donnant, en mélange avec l'eau, des émulsions translucides (microémulsions) possédant des propriétés d'anticorrosion	MAE	Ces émulsions peuvent devenir opaques en service
		Concentrats du type MAE possédant des propriétés de réduction de frottement et/ou « extrême pression » (EP)	MAF	
		Concentrats donnant, en mélange avec l'eau, des solutions transparentes possédant des propriétés d'anticorrosion	MAG	Peuvent être chargées pour des applications particulières
		Concentrats du type MAG possédant des propriétés de réduction de frottement et/ou « extrême pression » (EP)	MAH	
		Graisses et pâtes appliquées en solution dans l'eau	MAI	

(1) Cf. tableau 3.

2. Conception des lubrifiants réfrigérants (LR)

Machines, outils, lubrifiants, pièces et ouvrier, représentent tous des composants dans un système de production.

L'importance de cet article ne réside pas dans la présentation de la technique d'usinage, mais dans l'exposé de la conception et des possibilités des lubrifiants réfrigérants, afin de pouvoir développer une vue d'ensemble sur leurs propriétés.

Pourquoi utilisons-nous des lubrifiants réfrigérants ?

La fonction des lubrifiants réfrigérants est d'augmenter l'efficacité des opérations d'usinage qui se manifeste par une plus grande productivité, une augmentation de la tenue des outils dans le temps, une amélioration des états de surface en respectant les tolérances.

Fonctions des lubrifiants réfrigérants

Elles sont au nombre de quatre.

- Lubrification

Réduction du frottement entre l'outil et la pièce et entre l'outil et les copeaux.

- Refroidissement

Évacuation de la chaleur générée dans la zone de déformation.

- Évacuation des copeaux

Les lubrifiants réfrigérants doivent évacuer les copeaux afin de tenir propre la zone d'opération.

- Protection anticorrosion pendant l'usinage

En résumé, nous pouvons simplement dire que **les lubrifiants réfrigérants sont destinés à faciliter l'usinage des métaux aux utilisateurs.**

Pour obtenir de bons lubrifiants réfrigérants, il est nécessaire d'instaurer une collaboration étroite entre les utilisateurs et les fabricants. Sans cette harmonie, on ne peut pas répondre aux exigences d'une grande diversité d'utilisateurs qui demandent les produits les plus variés. Par la force des choses, chaque fabricant se voit contraint de poursuivre des recherches à sa manière, d'autant plus que les exigences de l'utilisateur sont de différentes importances. Souvent on rencontre des demandes qui ne peuvent pas être toutes satisfaites en même temps, soit parce qu'elles se contredisent, soit parce qu'elles ne peuvent pas être réalisées par les moyens disponibles aujourd'hui.

2.1 Classification des lubrifiants réfrigérants

Par définition, un lubrifiant réfrigérant est un produit qui sert au refroidissement et à la lubrification de la coupe lors de l'usinage par enlèvement de matières. Il sert aussi à évacuer les copeaux lors du perçage, tournage, fraisage, rectification, etc. Ce sont des liquides qui réduisent le frottement, donc l'usure des outils et le dégagement thermique, sans toutefois le supprimer totalement.

Du fait de la grande variété des procédés d'usinage, il existe de nombreuses sortes de lubrifiants réfrigérants (figure 14).

La différence essentielle pour la subdivision de la figure 14 réside ainsi dans le fait que le lubrifiant réfrigérant contient ou non de l'eau en état d'utilisation. L'exploitant doit donc se décider pour l'une ou l'autre de ces deux possibilités, son choix étant dicté par l'importance relative qu'il attache à l'effet refroidissant ou à l'effet lubrifiant. Les chiffres du tableau 5 permettent de comparer ces deux propriétés.

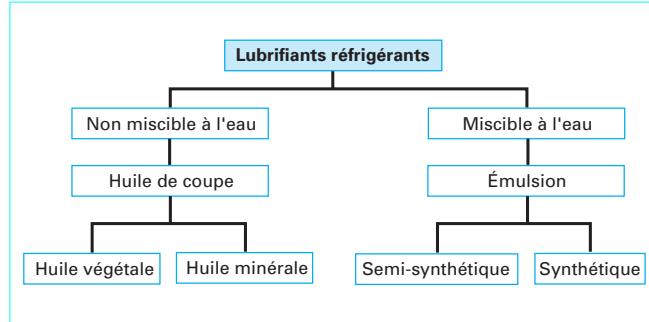


Figure 14 – Classification des lubrifiants réfrigérants

Tableau 5 – Données physico-chimiques de l'eau et de l'huile

Propriété physico-chimique	Eau	Huile	Eau/Huile
Capacité thermique massique [J/(g · K)]	4,2	1,9	2/1
Conductivité thermique[W/(m · K)]	0,58	0,14	4/1
Enthalpie d'évaporation(kJ/g)	2,3	0,2	11/1

On constate notamment que, en raison de ses propriétés physiques, l'eau est un meilleur réfrigérant que l'huile.

Remarques

Lors d'une opération d'usinage, il est important d'assurer un bon refroidissement mais aussi d'avoir une lubrification. Un refroidissement efficace est exigé lorsque le volume de copeaux est important (opérations d'ébauche) ; par contre, nous demandons plutôt une bonne lubrification pour des opérations de finition et pour l'usinage sans enlèvement de copeaux.

Une huile de coupe ayant également comme fonction le refroidissement, une de ses caractéristiques doit donc être une bonne conductivité spécifique de la chaleur, c'est-à-dire un bon pouvoir de mouillage qui contribue à un bon équilibre entre coupe et refroidissement.

2.2 Évolution des lubrifiants réfrigérants miscibles à l'eau au cours du temps

Dans le passé, on a remplacé des huiles à cause d'un pouvoir refroidissant insuffisant par des solutions de soude caustique et d'autres savons. Par leur alcancie, ces solutions assuraient partiellement un pouvoir anticorrosion. Ce genre de produit ne répondait pas, par contre, au besoin de rendement exigé par les industriels. Pour cette raison, les ingénieurs ont cherché d'autres solutions comme l'emploi d'émulsions à base d'huile minérale. Cela a constitué un net progrès. En revanche, il restait toujours de graves désavantages. Effectivement, ces produits étaient sensibles à une attaque microbiologique et, par conséquent, ils imposaient de fréquentes vidanges. Les produits synthétiques (exempts d'huile) n'apportaient pas, non plus, de solution satisfaisante ; bien au contraire, ils pouvaient causer de graves dégâts sur les machines (corrosion, peinture, gommage, eau agressive, boues ou élastomères, etc.).

■ Émulsions aqueuses

Les lubrifiants réfrigérants aqueux se composent d'environ 40 à 70 % d'huile minérale et d'émulgateurs ioniques et non ioniques. L'huile minérale forme la base. Les additifs sont solubles dans l'huile et ont comme fonction une amélioration du pouvoir anticorrosion, du pouvoir lubrifiant, du comportement antimousse, de la résistance aux micro-organismes, etc.

■ Lubrifiants réfrigérants semi-synthétiques

Dans cette catégorie de liquides d'usinage, l'huile minérale est partiellement remplacée par d'autres liquides porteurs, du même genre que ceux utilisés dans les produits entièrement synthétiques. La teneur en huile minérale est de 3 à 50 % selon les propriétés souhaitées.

■ Lubrifiants réfrigérants entièrement synthétiques

Les lubrifiants réfrigérants synthétiques sont des solutions pures et non un mélange colloïdal tel qu'une émulsion. Ils sont exempts d'huile. Ce sont des liquides transparents, faciles à manipuler et d'une préparation très aisée. La composition chimique des lubrifiants réfrigérants peut varier considérablement.

Les produits de synthèse utilisés à ce jour se composent de produits éthoxylés, de polyglycols, d'acide borique, d'esters de polyglycols, de sorbitol et de leurs esters, d'esters d'acide phosphorique, de sels de triéthanolamine, de divers acides organiques, etc.

Leur transparence est considérée comme un avantage, mais, lors de l'utilisation, le produit perd cette transparence et se charge d'impuretés comme des huiles de machines, par exemple. Ces impuretés influent sensiblement sur la stabilité des produits synthétiques. De plus, la base de ces produits est sensible à la formation de champignons, micro-organismes guère souhaités dans un système de lubrification.

Le problème des effluents synthétiques est également à considérer. En effet, ces produits se chargent d'huiles de fuite et, par conséquent, lors de leur élimination, ils sont à traiter de la même façon que des produits contenant de l'huile.

De plus, leur mauvaise compatibilité avec les machines-outils a pour conséquence que les fabricants ne recommandent que très rarement des produits synthétiques.

L'utilisation des produits synthétiques se limite donc à des opérations d'usinage bien spécifiques comme l'usinage de carbures, l'usinage de verre, de pierre, etc.

Comment reconnaître un produit synthétique sans analyse chimique ? C'est d'abord un produit transparent. De plus, en frottant une solution entre deux doigts, il ne reste pas de film lubrifiant mais plutôt une couche collante.

2.3 Conception et stabilité des lubrifiants réfrigérants miscibles à l'eau

On parle beaucoup à l'heure actuelle des performances et de la stabilité des lubrifiants réfrigérants. Leurs propriétés (figure 15) sont déterminées d'une part par leur composition et d'autre part sont fonction de leur utilisation, mais aussi de l'entretien et du soin apporté au cours de l'usinage.

2.3.1 Composition du concentré

Les groupes de produits constitutifs les plus importants entrant dans la fabrication des lubrifiants réfrigérants miscibles à l'eau sont les suivants :

- des **huiles minérales** de nature naphténique ou paraffinique (hydrocarbures) ;

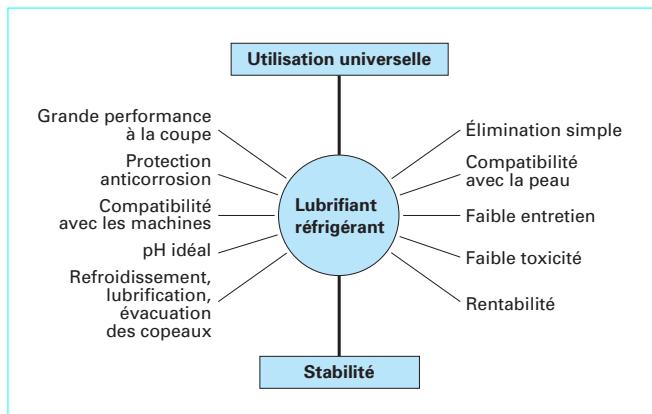


Figure 15 – Propriétés exigées des lubrifiants réfrigérants miscibles à l'eau

- des **huiles végétales** (huiles natives, comme huile de colza, huile de ricin, huile d'hélicanthe) ;

- des **huiles synthétiques** :

- PAO (Poly- α -Oléfines), également des hydrocarbures,
- polyglycols,
- huiles-esters ;

- des **émulgateurs** :

- émulgateurs ioniques comme des savons alcalins, des savons amines, des sulfonates, par exemple,
- émulgateurs non ioniques, comme des oxydes polyéthyleniques, etc. ;

- des **inhibiteurs de corrosion** tels que sels alcalins et alcanolamines d'acides organiques, sulfonates, amines, amides, composés organiques de bore, etc. ;

- des **additifs polaires** : huiles animales et/ou végétales (de ricin, d'olive, d'arachide), esters d'acides organiques ;

- des **additifs haute pression** particulièrement nécessaires pour les opérations d'usinage difficiles ; mentionnons parmi eux des composés du chlore, du soufre et du phosphore ;

- des **biocides** pour limiter la contamination-prolifération microbienne (bactéries, champignons, levures dans les émulsions).

Parmi ces additifs, certains peuvent présenter des inconvénients au point de vue hygiène et sécurité (tableau 6).

2.3.2 Système d'émulgateurs

2.3.2.1 Définition

Une émulsion est un système dispersé de deux liquides non miscibles entre eux. Le liquide présent en excès est désigné par phase externe, continue ou fermée, le liquide qui est plus ou moins finement réparti est désigné par phase interne ou dispersée.

Les lubrifiants réfrigérants mélangés d'eau sont précisément un exemple d'une telle émulsion, mais il y en a aussi de naturelles.

Exemple : le lait de vache est une émulsion naturelle huile/eau ; la teneur en eau du lait de vache est d'environ 80 %.

2.3.2.2 Structure et fonction

Les émulgateurs sont des agents tensioactifs qui permettent de mélanger de l'huile dans l'eau. Ces agents abaissent la tension superficielle des deux liquides. L'huile peut alors être répartie dans l'eau sous forme de gouttelettes très fines (figure 16).

Tableau 6 – Influence de certains additifs sur les problèmes d'hygiène et de sécurité

Additif	Avantages		Inconvénients
Bore	<ul style="list-style-type: none"> Apporte une biostabilité dans le développement des bactéries 		<ul style="list-style-type: none"> Peut générer du gommage Limite la prolifération de certains champignons Reste dissous dans l'eau et se retrouve dans les effluents aqueux
DEA (diéthanolamine)	avec	<ul style="list-style-type: none"> Tamponne les produits à valeur de pH d'environ 9 Bon pouvoir anticorrosion 	<ul style="list-style-type: none"> Se décompose lors de l'usinage avec la température en libérant des nitrosamines
	sans	<ul style="list-style-type: none"> Moins agressif pour les opérateurs 	<ul style="list-style-type: none"> Plus sensible au moussage
MEA (monoéthanolamine)	<ul style="list-style-type: none"> Ne se décompose pas en nitrosamines Bon pouvoir d'anticorrosion 		<ul style="list-style-type: none"> Produit irritant Valeur de pH des solutions plus élevée ⇒ À corriger
TEA (triéthanolamine)	<ul style="list-style-type: none"> Moins irritant que MEA Pas de nitrosamines 		<ul style="list-style-type: none"> Moins bon pouvoir anticorrosion Faible valeur de pH
Triazine	<ul style="list-style-type: none"> Produit dont l'étiquetage différent correspond aux nouvelles normes d'hygiène et sécurité 		<ul style="list-style-type: none"> Bactéricide reconnu irritant pour l'épiderme

On distingue des émulsions huile dans l'eau (h/e) et eau dans huile (e/h).

Les lubrifiants réfrigérants sont normalement des émulsions huile dans l'eau. L'eau est donc la phase extérieure.

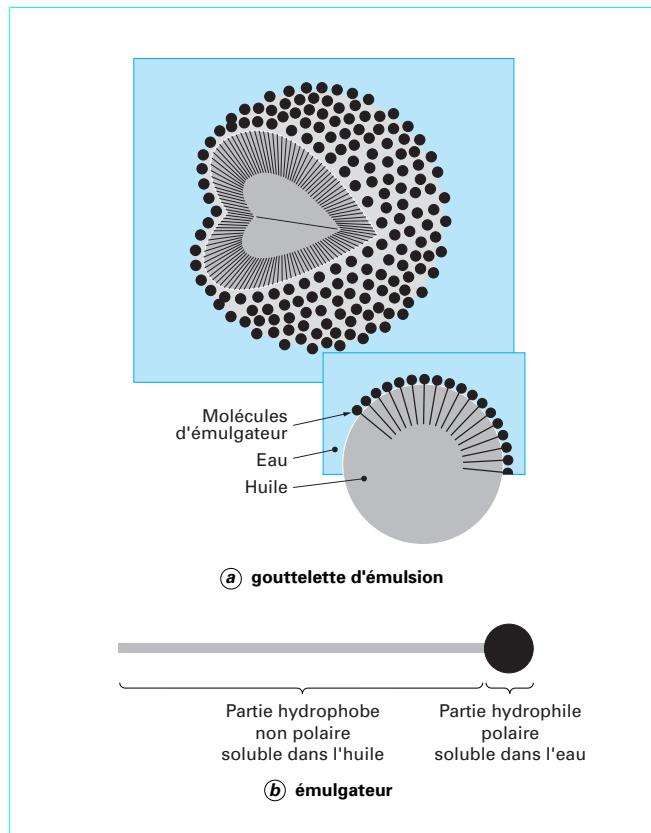


Figure 16 – Présentation schématique d'une gouttelette d'émulsion

Les différences entre ces deux systèmes sont mises en évidence figure 17.

Dans les émulsions h/e, les gouttelettes d'huile auraient tendance à monter. Mais, à cause de leurs charges électrostatiques de même signe, elles se repoussent mutuellement, ce qui provoque un mouvement permanent qui les empêche de monter et de former de plus grandes gouttes. En outre, les petites gouttes d'huile présentent une plus grande vitesse que les grandes gouttes, ce qui les fait tournoyer plus intensément. Ce phénomène (appelé mouvement moléculaire brownien) empêche une séparation de l'émulsion, ce qui est d'une importance capitale pour sa stabilité, même si elle reste longtemps au repos.

Dans les lubrifiants réfrigérants, des combinaisons entre les différents systèmes émulgateurs (figure 18), sont souvent utilisées.

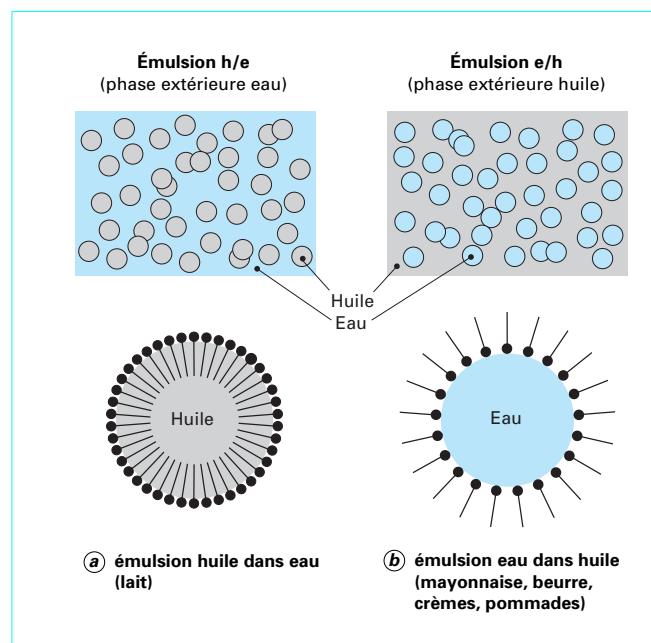
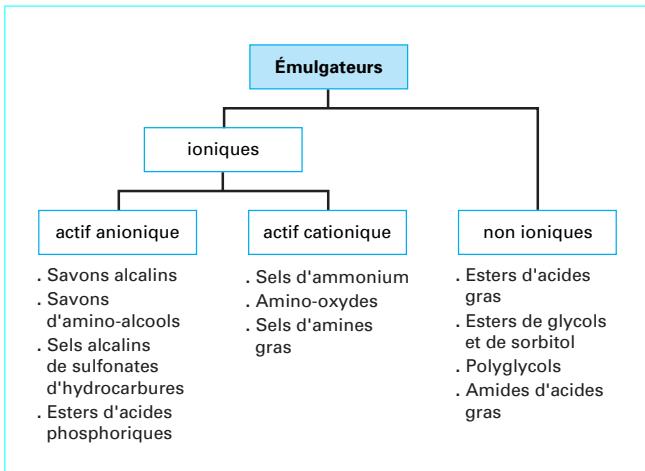


Figure 17 – Structure d'une émulsion



2.3.2.3 Facteurs influant sur la stabilité

La stabilité de l'émulsion est en fait sa propriété capitale. Après les brèves considérations techniques précédentes, mentionnons encore la liste des facteurs clés pouvant affecter cette stabilité :

- la grandeur moyenne et la répartition des gouttelettes ;
- le type et la quantité d'émulgateur ;
- la valeur du pH de l'émulsion ;
- la température (chaleur et froid) ;
- les proportions des phases (concentration) ;
- la viscosité (de la phase extérieure) ;
- la masse spécifique (la vitesse de séparation étant proportionnelle à la différence de densité huile/eau).

Pour les émulsions techniques comme les lubrifiants réfrigérants miscibles à l'eau entrent en outre en ligne de compte :

- la charge en souillures ;
- la charge en huile étrangère ;
- la teneur en copeaux et abrasifs métalliques ;
- l'intensité du jet du lubrifiant réfrigérant, le rapport volume/débit ;
- la performance et la pression des pompes.

Nous étudierons plus particulièrement l'influence des micro-organismes sur les émulsions dans l'article suivant [BM 7 065] de ce traité.

2.3.2.4 Influence des huiles étrangères

Ces huiles sont :

- des huiles de fuite hydraulique, dans 95 % des cas ;
- des huiles de graissage ;
- parfois des huiles de protection déjà sur la pièce.

Les émulgateurs non ioniques ne possédant pas de charges électrostatiques, des combinaisons d'émulgateurs mal adaptés peuvent avoir comme conséquence que ces huiles étrangères soient émulsifiées.

Les phénomènes résultants sont schématisés figure 19.

De ces constatations, on en déduit que l'huile étrangère doit être éliminée périodiquement.

2.4 Additifs anti-usures

Les additifs anti-usures sont nécessaires dans les lubrifiants réfrigérants, afin de garantir une coupe optimale des outils dans

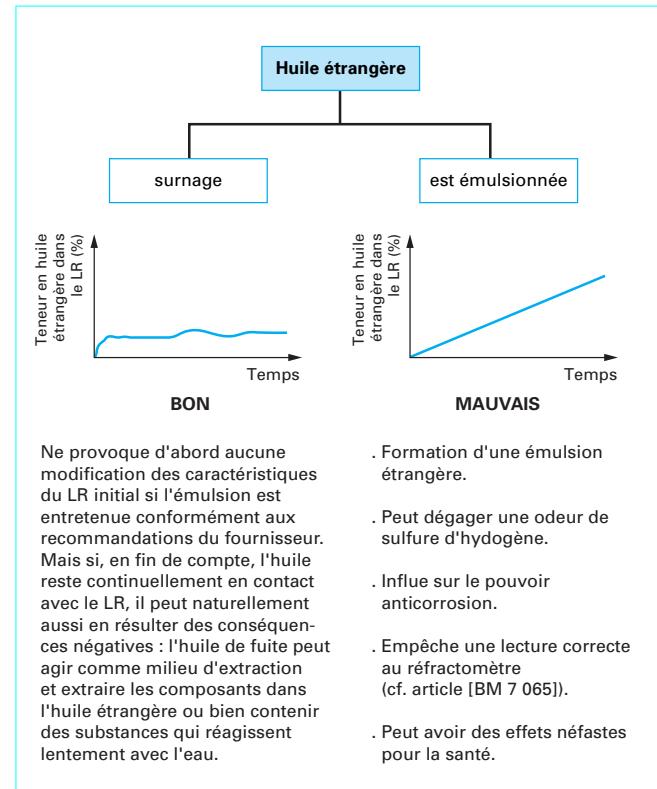


Figure 19 – Influence de l'introduction d'une huile étrangère dans l'émulsion de lubrifiant réfrigérant

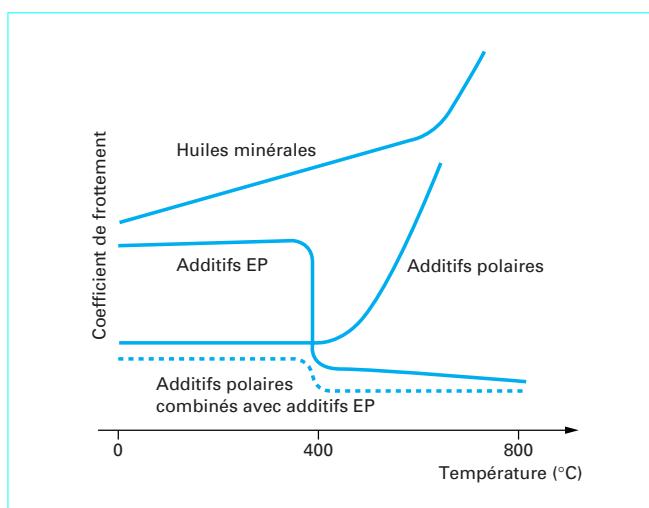


Figure 20 – Comportement anti-usure de différents lubrifiants
(d'après Bowden)

les procédés d'usinage. On distingue les additifs à action douce (additifs polaires) et des additifs actifs extrême pression (EP).

Le comportement anti-usure de différents lubrifiants est schématisé figure 20.

2.4.1 Additifs polaires

Les additifs à action douce comprennent avant tout les additifs polaires du type tensioactifs. On entend par là des matières dont les molécules contiennent des groupes polaires dans lesquels la charge électrique est inégalement répartie, raison pour laquelle la molécule se comporte comme un dipôle ou comme un petit aimant. Les groupes polaires de la surface métallique sont attirés dans le champ de force de celle-ci. Il se forme ainsi un film adhérent à la surface métallique, possédant une plus grande résistance à la rupture et, donc aussi, une plus grande charge admissible que celle d'un film d'huile minérale pure aux propriétés lubrifiantes moyennes.

Ces groupes d'additifs polaires comprennent principalement les graisses végétales (v) et animales (a) comme :

- les acides gras (v + a), utilisés sous forme de savons ;
- l'huile de colza (v) ;
- l'huile de lard (a) ;
- l'huile de poisson (a) ;
- l'huile d'arachide (v) ;
- et, dans une toujours plus large mesure, les produits synthétiques correspondants (esters, esters complexes).

L'action des substances polaires est basée sur une absorption purement physique. Il se forme une couche qui agit entre les pièces mobiles comme un film lubrifiant à viscosité élevée, pâteux, et qui possède une capacité d'absorption de la pression plus élevée que celle d'un film liquide (charge admissible).

Exemple : la température de fusion d'un savon métallique est d'environ 200 °C. Pour des températures supérieures, l'efficacité du film diminue fortement. Il en résulte donc que les lubrifiants réfrigérants contenant des additifs polaires garantissent une bonne lubrification seulement lorsque la charge et l'échauffement restent dans des limites peu élevées (20 à 200 °C environ) (figure 21).

2.4.2 Additifs EP (extrême pression)

Pour des sollicitations plus élevées, on utilise des lubrifiants réfrigérants contenant des additifs EP. On utilise le plus souvent :

- le soufre ;
- le chlore ;
- le phosphore ;

dans un composé approprié, par exemple sous forme de paraffines chlorées. (À l'état élémentaire, on utilise parfois le soufre, mais jamais le chlore ni le phosphore.)

Ces composés réagissent chimiquement sur les surfaces métalliques mobiles (pièces à usiner et outils) en formant une couche lustrante solide à haute résistance à la compression et à faible résistance au cisaillement, et qui sépare les surfaces glissant l'une sur l'autre en empêchant l'usure (fonction identique à celle des outils à revêtement carbure TiN).

Cette réaction chimique se produit uniquement à une température minimale bien déterminée, qui diffère selon les additifs (figure 21).

Ces additifs sont activés seulement par la température (bonnes à très bonnes propriétés lubrifiantes dans la plage de températures de 80 à 1 000 °C environ). Sous l'influence de températures élevées, ils se décomposent chimiquement, mais des produits sont formulés pour mieux travailler à ces températures (cas des UGV, usinages à grande vitesse par exemple). À température ambiante,

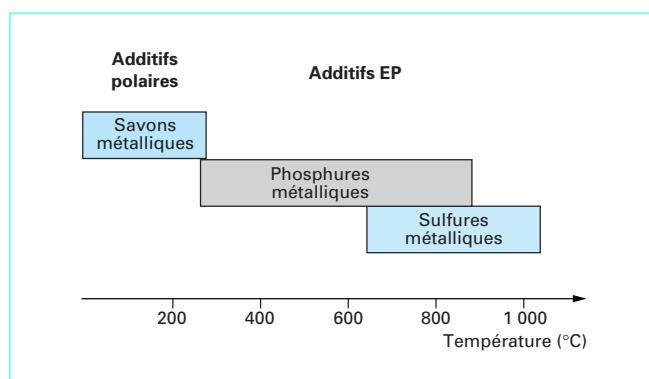


Figure 21 – Plage de températures efficaces des additifs polaires et EP

les additifs doivent se comporter de manière neutre vis-à-vis des pièces à usiner et des machines.

Exemple : les huiles contenant du soufre libre peuvent, au contact du cuivre en particulier, créer un tachage. Les additifs à base de chlore et de phosphore donnent le plus souvent des colorations seulement à des températures élevées, et uniquement lorsqu'ils sont surchauffés, c'est-à-dire lorsque la quantité de lubrifiant réfrigérant ne correspond pas à la chaleur présente à évacuer.

Les lubrifiants réfrigérants contenant des additifs EP sont utilisés surtout pour des matériaux difficilement usinables. On trouve parmi eux des matériaux lubrifiants (fer pur, nickel pur), l'acier à basse teneur en carbone, les aciers tenaces et très durs, les aciers fortement alliés ainsi que les aciers austénitiques très tenaces qui durcissent au cours de l'usinage.

Les lubrifiants réfrigérants modernes devraient être alliés de manière à pouvoir s'adapter individuellement aux exigences fixées. Cela signifie que, suivant les sollicitations, ils ne doivent pas être activés par les additifs EP plus qu'il n'est nécessaire, afin d'éviter la soudure entre la pièce à usiner et le matériau.

3. Conclusion

Les différents avantages attendus de la lubrification sont :

- une diminution du frottement et de l'usure ;
- une réduction de la température d'usinage ;
- une réduction du temps d'usinage ;
- une amélioration de la stabilité des pièces à usiner ;
- une amélioration des états de surface des pièces à usiner ;
- une augmentation de la durée de vie de l'outillage ;
- une augmentation de la production.

Pour cela, l'huile soluble entrant dans la fabrication des lubrifiants réfrigérants doit posséder les propriétés résumées dans le tableau 7.

Sur ces bases, le tableau 8 passe en revue les différentes conditions d'utilisation des fluides solubles dans divers types d'opérations d'usinage.

Tableau 7 – Composition type d'une huile dite soluble

Composant	Fonction
Agent améliorant l'ontuosité	Améliore les propriétés lubrifiantes des fluides de coupe
Agent anti-usure	Limite l'usure de l'outil par la formation d'un film protecteur sur les surfaces
Agent extrême pression (EP)	Réduit les risques de grippage entre les surfaces frottantes, par la formation d'un film protecteur sur les surfaces. De la quantité de dopes EP dépend la résistance de ce film, donc plus l'usinage est difficile, plus les quantités EP sont importantes.
Agent inhibiteur de corrosion	Empêche la corrosion des métaux
Émulgateurs (émulsifiants)	Permet la mise en émulsion stable d'huile dans l'eau et entre dans la fabrication des lubrifiants solubles de type émulsion et semi-synthétique
Agent mouillant	Permet la décantation des copeaux et augmente les propriétés réfrigérantes du produit
Agent antimousse	Réduit la formation de mousse
Agent biorésistant	Limite les proliférations bactériennes et fongiques dans les fluides aqueux

Tableau 8 – Conditions d'emploi des fluides solubles dans diverses opérations d'usinage

Opérations	Matériaux concernés (1)													
	Aluminium et alliages		Cuivre et alliages		Fontes		Aciers doux Aciers de décolletage		Aciers mi-durs		Aciers durs		Aciers alliés Aciers inoxydables	
	Quantité nécessaire (%)	Type	Quantité nécessaire (%)	Type	Quantité nécessaire (%)	Type	Quantité nécessaire (%)	Type	Quantité nécessaire (%)	Type	Quantité nécessaire (%)	Type	Quantité nécessaire (%)	Type
Tournage Décolletage	6	E	5	E	4	M	4	M	5	E	5	E	5	E
Fraisage	6	E	5	E	4	M	5	M	5	E	5	E	5	E
Perçage Forage	10	E	8	E	5	E	6	E	6	E	6	E	8	E
Filetage Taraudage	10	E	8	E	5	E	6	E	6	E	6	E	8	E
Rectification	4	M	3	S	3	S	3	S	3	S	3	S	5	M
Sciage	8	E	6	E	5	E	6	E	6	E	6	E	8	E
Taillage d'engrenage		HE		HE		HE		HE		HE		HE		HE
Brochage	10	E	8	E	5	E	8	E	8	E	8	E	10	E
Rodage					6	S	6	S	6	S	6	S		
Shaving	8	E	6	E	5	E	6	E	6	E	8	E	8	E

(1) E : émulsion
M : microémulsion
S : émulsion du type synthétique
HE : huile entière.

Références bibliographiques

- [1] KRONENBERG (M.). – *Machining science and application*. Pergamon Press (1966).

Dans les Techniques de l'Ingénieur

- [2] Rubrique *Usinage*. Traité Génie mécanique, vol BT 1 et BT 2.