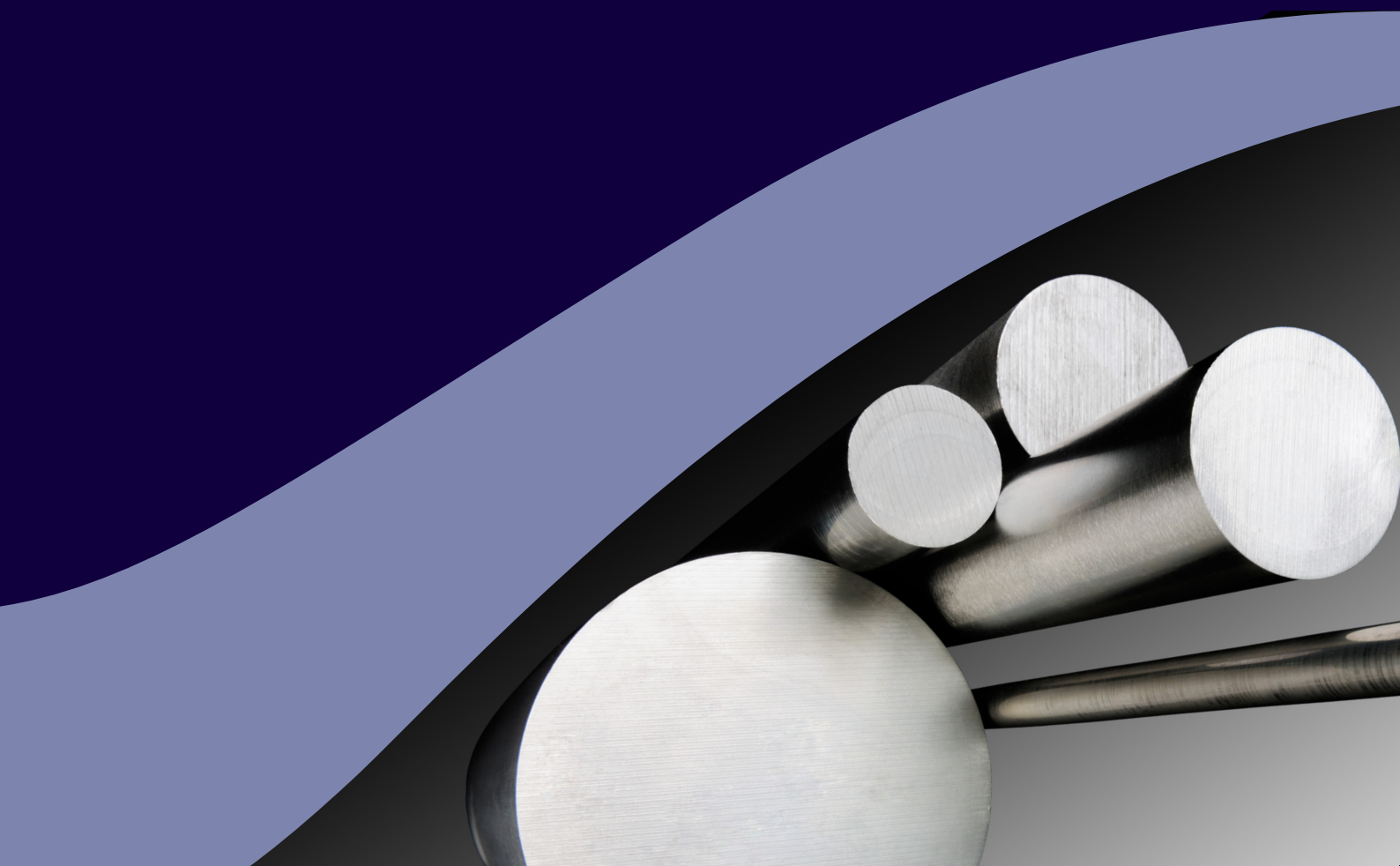
ERASTEEL

LA RECTIFICATION
des aciers rapides



INTRODUCTION

L'acier rapide (ou HSS, c'est-à-dire High Speed Steel en anglais) est utilisé pour les outils de coupe depuis plus de cent ans. Sa haute teneur en éléments d'alliage lui permet d'offrir une combinaison très performante de ténacité et de résistance à l'usure. Mais elle le rend également plus difficile à rectifier que les aciers traditionnels faiblement alliés, ce qui pose des problèmes très particuliers lorsqu'on vise à la fois une qualité élevée et une haute productivité.

Par conséquent, l'obtention de résultats réussis et réguliers requiert une connaissance approfondie des principes fondamentaux de la rectification, ainsi que les compétences nécessaires pour appliquer ce savoir à la rectification de l'acier rapide.

Cette brochure fournit des explications détaillées sur la rectification de l'acier rapide. Pour commencer, elle décrit les composants d'une meule et la nomenclature de marquage des meules, et explique les mécanismes d'abrasion et d'usure de la meule, et comment ceux-ci affectent la performance en rectification. Elle décrit ensuite les quatre types différents de "brûlures de rectification" et donne des conseils pour en diminuer la sévérité et améliorer la performance. Elle explique le terme de "meulabilité" et donne la meulabilité relative de différentes nuances Erasteel en même temps que les types de meules recommandés. Elle montre ensuite comment la métallurgie des poudres influe sur la meulabilité. Enfin, elle fournit un chapitre détaillé sur la résolution de problèmes, afin d´aider à améliorer la performance de la rectification.

La rectification moderne est aujourd'hui une opération high-tech très avancée. Néanmoins, la rectification requiert tout autant d'habileté qu'autrefois. Cet affûteur de couteaux parisien d'antan savait qu'un bon meulage augmentait la durée de vie des outils et améliorait leur tranchant.

TABLE DES MATIERES

La meule: principes fondamentaux 4

Qu'est-ce que la rectification? 7

Usure de la meule 8

Composition de l'acier rapide et rectification 10

Dommages thermiques et "brûlures de rectification" 13

Le fluide de coupe 18

Dressage et mise au rond 20

Débit matière et épaisseur de copeau 21

Meulabilité 23

Rectification des aciers rapides ASP® 24

Choix de la meule 27

Problèmes, causes et remèdes 28

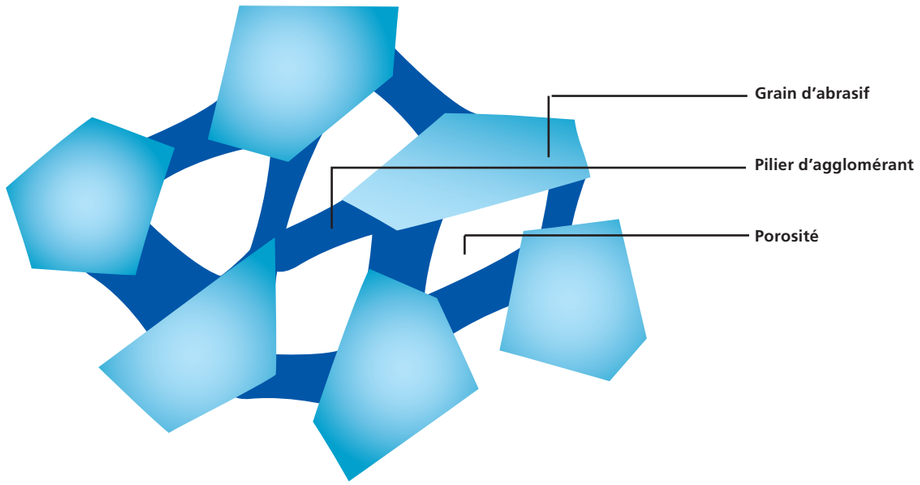
Tableau de meulabilité 31

LA MEULE: PRINCIPES FONDAMENTAUX

Une meule est composée de trois constituants de base:

- ***L'abrasif***
- ***Le liant ou agglomérant***
- ***La porosité***

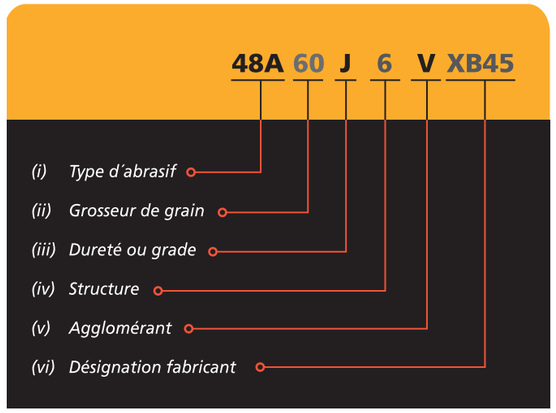
L'abrasif est le matériau très dur qui effectue la coupe. Sa cohésion est assurée par le liant (ou agglomérant). La porosité correspond simplement à des poches d'air emprisonnées dans la meule. Elle joue un rôle important, en permettant d'une part au fluide de refroidissement d'atteindre l'interface grains-pièce, et en fournissant d'autre part l'espace nécessaire à la formation du copeau. Les meules à liant vitrifié ont une porosité naturelle élevée. Les meules à liant résine ont une porosité moindre ou nulle. Les liants métalliques ne présentent pratiquement aucune porosité naturelle.



Les trois constituants d'une meule: abrasif, agglomérant (liant), porosité.

COMPOSITION

La composition d'une meule et les pourcentages relatifs de ses trois constituants déterminent le comportement de la meule en cours d'utilisation. Les caractéristiques d'une meule sont inscrites sur la meule, et suivent la *norme d'identification des meules*. La codification qui est utilisée ici concerne les meules à abrasifs conventionnels. La notation diffère quelque peu pour les meules superabrasives.



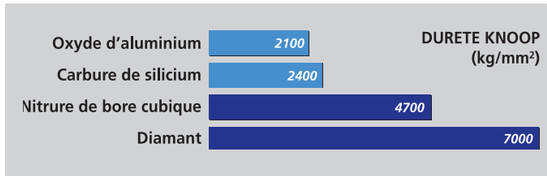
Identification des meules pour les abrasif conventionnels

TYPE D'ABRASIF (i)

Cette lettre désigne le type d'abrasif utilisé.

A	**Oxyde d'aluminium (Al_2O_3)**
C	**Carbure de silicium (SiC)**
B	**Nitrure de bore cubique (CBN)**
D	**Diamant**

L'Oxyde d'Aluminium et le *Carbure de Silicium* sont qualifiés d'*abrasifs conventionnels*. Le *Nitrure de Bore Cubique (CBN)* et le *Diamant* sont qualifiés de superabrasifs. Le type particulier d'abrasif utilisé dépend de l'application. L'*Oxyde d'Aluminium* est fréquemment utilisé pour rectifier l'acier rapide. Le *Carbure de Silicium,* bien que plus dur, est aujourd'hui rarement utilisé pour rectifier l'acier rapide. Le *Nitrure de Bore Cubique*, grâce à sa dureté élevée et à sa bonne conductibilité, convient bien pour l'acier rapide, en particulier pour les nuances fortement alliées. Cependant, il est nettement plus cher que les abrasifs conventionnels, et impose davantage de contraintes sur les spécifications machine. Le *Diamant,* malgré sa dureté très élevée, ne convient pas à la rectification de l'acier rapide, en raison de sa mauvaise conductibilité thermique et de sa réactivité chimique avec le fer.



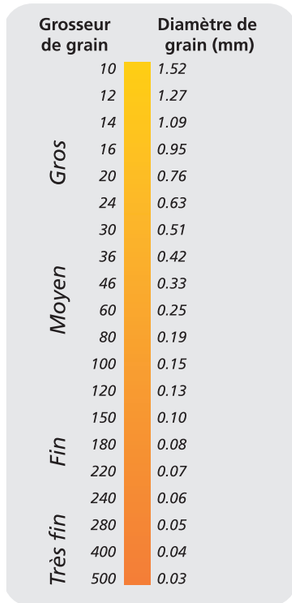
Dureté des grains d'abrasif

Les chiffres précédant la lettre indiquent la variété exacte de l'abrasif utilisé ; ils sont différents pour chaque fabricant. Par exemple, il existe de nombreuses sortes d'*Oxydes d'Aluminium*. *L'Oxyde d'Aluminium blanc* est dur et "friable", ce qui signifie qu'il se brise et "s'auto-affûte" au cours du meulage, ce qui permet le renouvellement de la coupe des grains. L'*Oxyde d'Aluminium brun* est résilient, ce qui signifie qu'il se brise plus difficilement. Récemment, les abrasifs "céramiques" SG ou abrasifs solgel ont acquis une certaine popularité. Ils possèdent une structure cristalline qui se micro-fracture à l'usage, permettant de conserver un bon pouvoir de coupe tout en maintenant l'usure de la meule au minimum.

GROSSEUR DE GRAIN (ii)

Le chiffre placé après le symbole de l'abrasif caractérise la grosseur des grains d'abrasif de la meule. Il est lié à la taille des mailles (nombre par "inch" ou pouce) du tamis utilisé. Par conséquent, *un nombre élevé correspond à des grains fins*. En général, doubler la grosseur d'abrasif revient à diminuer de moitié le diamètre des grains, ce qui multiplie approximativement par quatre le nombre de grains par unité de surface sur la surface de meulage.

Les gros grains sont utilisés pour des débits matière élevés, lors de la rectification de matériaux tendres, et lorsque la surface de contact est grande. Ils donnent un état de surface grossier, et le rayon de courbure minimum qui peut être réalisé est plus grand. Les grains fins sont utilisés pour la rectification de haute précision, pour la rectification de matériaux durs, et quand la surface de contact est réduite. Ils permettent d'obtenir un meilleur état de surface, et un rayon de courbure minimum plus petit.



	Grosseur de grain	Diamètre de grain (mm)
Gros	10	1.52
	12	1.27
	14	1.09
	16	0.95
	20	0.76
	24	0.63
Moyen	30	0.51
	36	0.42
	46	0.33
	60	0.25
	80	0.19
	100	0.15
Fin	120	0.13
	150	0.10
	180	0.08
	220	0.07
Très fin	240	0.06
	280	0.05
	400	0.04
	500	0.03

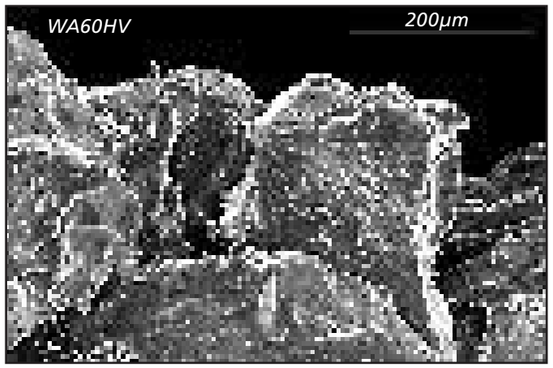
GRADE OU DURETE (iii)

Le grade indique la "résistance" de la meule, c'est à dire la façon dont l'agglomérant maintient la cohésion des grains. Il est parfois appelé "dureté de meule", ce qui peut induire en erreur, car *il n'est pas lié à la dureté de l'abrasif.* Pour les meules à agglomérants vitrifiés, le grade fait référence à la part relative de liant et de porosité de la meule, pour une quantité d'abrasif donnée. Les meules de grades élevés ont *davantage de liant et une porosité plus faible,* ce qui les rend plus dures. Les meules de grade faible ont *moins de liant et une porosité plus importante,* ce qui les rend plus "tendres". Pour les meules à agglomérants métalliques, dont la porosité naturelle est quasi-inexistante, le grade est déterminé par la composition du liant.

Les meules de grade élevé ont tendance à *bien garder leur profil,* mais sont *plus sujettes à brûler,* car les grains ne se détachent pas lorsqu'ils s'émoussent. Les meules tendres ont tendance *à perdre leur profil, mais sont moins sujettes à brûler,* car les grains sont évacués au fur et à mesure qu'ils s'usent, permettant un auto-affûtage et une coupe franche.

Un bon choix de meule dépend d'un grand nombre de facteurs. Les matériaux difficiles à rectifier provoquent un émoussage rapide de la meule. Par conséquent, ils exigent un grade plus tendre, qui permette à la meule de garder son pouvoir de coupe. Les opérations de rectification avec *un grand arc de contact* demandent des meules tendres, les forces appliquées aux grains pouvant se répartir sur une surface plus grande.

Un choix optimal de meule pour une application donnée nécessite de trouver un compromis entre résistance et coupe: la meule doit être suffisamment dure pour ne pas perdre son profil, mais suffisamment tendre pour permettre l'évacuation des grains émoussés.



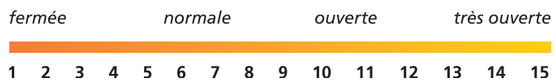
Grains d'une meule. Les meules fraîchement dressées sont coupantes, mais elles s'émoussent à l'usage. Le choix d'une meule tendre implique moins de liant et davantage de porosité, afin que les grains se détachent et soient évacués lorsqu'ils sont émoussés : la meule "s'auto-affûte".

Les échelles de dureté ne sont pas normalisées : elles différent d'un fabricant à l'autre. Néanmoins, dans chaque famille de produits et pour chaque type de meules, le grade indique la résistance relative de la meule, d'un grade à l'autre.

Grades de meules. Les meules vitrifiées de grades élevés ont plus de liant et ont un comportement plus dur .

STRUCTURE (iv)

La structure indique *l'espacement de l'abrasif dans la meule,* souvent défini comme la concentration volumique d'abrasif de la meule. Un indice faible indique un pourcentage d'abrasif élevé et une structure "fermée". Un indice élevé indique un faible pourcentage d'abrasif et une structure "ouverte". Cet indice est souvent omis s'il s'agit de la valeur par défaut du fabricant. Les meules à structure ouverte sont utilisées pour faciliter l'enlèvement du copeau, et dans des applications pour lesquelles le refroidissement est important, telles que la rectification à avance lente et passe profonde.



Structure. Dans les meules à structure ouverte, les grains d'abrasif sont très espacés.

AGGLOMERANT (v)

Le rôle de l'agglomérant est de maintenir la cohésion des grains entre eux. Les types d'agglomérants les plus utilisés sont:

- **V** **Vitrifié**
- **B** **Résine synthétique**
- **R** **Caoutchouc**
- **M** **Métal**

Les meules à liant **vitrifié** sont les plus communes, et sont utilisées aussi bien avec des abrasifs conventionnels qu'avec des superabrasifs. Elles sont rigides, et conviennent donc bien pour la rectification de précision. Elles ont une structure poreuse, et ne sont pas sensibles aux hautes températures. Les meules à agglomérant **résine** sont moins poreuses, moins rigides (pour de meilleures finitions), résistantes (moins fragiles, adaptées aux opérations à fort rendement, à de hautes vitesses d'usinage, et à la présence de pressions latérales), et sont plus sensibles à la température que les agglomérants vitrifiés. Les liants **caoutchouc** sont utilisés pour l'entraînement centerless, pour certains tronçonnages sous arrosage, et lorsque l'on souhaite une très bonne finition. Les meules à agglomérant **métal** sont utilisées avec des superabrasifs.

DESIGNATION SPECIFIQUE DU FABRICANT (vi)

Les nombres et/ou chiffres supplémentaires décrivent le type particulier d'agglomérant utilisé, et sont différents pour chaque fabricant. Les autres caractères éventuels fournissent des informations complémentaires sur la meule.

QU'EST-CE QUE LA RECTIFICATION?

La rectification est un procédé d'usinage par abrasion dans lequel les grains d'abrasif servent d'outils coupants, et l'agglomérant de support. Comme le tournage et le fraisage, la rectification est un procédé de formation de copeaux. Cependant, les copeaux produits sont extrêmement petits, et les arêtes coupantes, très nombreuses et de forme irrégulière, "s'auto-affûtent". Les angles de coupe sont négatifs.

Au cours de la rectification, trois interactions principales entrent en jeu à l'interface abrasif-pièce: *la coupe, le repoussage et la friction*. Toutes trois génèrent de la chaleur.

LA COUPE

La coupe est la formation de copeaux sur les côtés du grain d'abrasif.

LE REPOUSSAGE

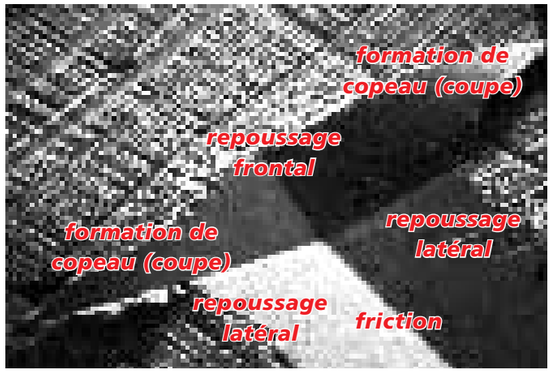
Le repoussage est le déplacement latéral et frontal de la matière par rapport à l'abrasif. Il n'y pas d'enlèvement de matière, mais le repoussage facilite la formation du copeau.

LA FRICTION

La friction est le glissement de la pièce contre l'abrasif, sans enlèvement de matière.

Au cours du meulage, ces trois interactions se produisent à des degrés variables. Une meule coupante travaille avec efficacité, car la coupe occupe une part prépondérante et génère moins de chaleur. Une meule émoussée travaille inefficacement, car la part prise par le repoussage et la friction est plus importante, ce qui génère davantage de chaleur.

Ci-dessus: résidus de rectification. La rectification est un procédé avec formation de copeaux (rectification d'acier rapide M9V avec une meule en WA46HV, X1000)



Ci-contre: un matériau tendre après le passage d'un abrasif dur à forme pyramidale. Il présente simultanément les trois types d'interactions abrasives: coupe, repoussage et friction.

USURE DE LA MEULE

Immédiatement après avoir été dressée, une meule est coupante et agit avec efficacité; il en résulte une proportion élevée de coupe. Cependant, au fur et à mesure que la pointe des grains s'émousse, la proportion de repoussage et de friction augmente, provoquant une augmentation de la puissance absorbée qui est directement liée à l'augmentation de l'échauffement, à des températures plus élevées et au phénomène de brûlure de rectification.

Les trois types d'usure de meule sont les suivants:

USURE PAR ABRASION (i)

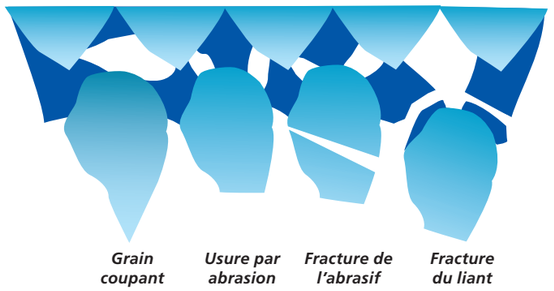
Elle se produit sur la pointe des grains. Bien qu'elle ne contribue que de manière marginale à l'usure totale de la meule, elle affecte de manière négative la performance du meulage car elle conduit à un échauffement important. On y fait souvent référence en parlant de développement de *facettes*, ou encore d'*émoussage*, de *perte de coupe* ou de *glaçage* de la meule. Les meules CBN ont, en raison de leur dureté élevée, un faible taux d'usure par abrasion.

FRACTURE DE L'ABRASIF (ii)

La fracture de l'abrasif correspond à une usure de la meule par fracture des grains d'abrasif. Elle apparaît quand les contraintes agissant sur le grain dépassent sa résistance. Les abrasifs friables, tels que l'*oxyde d'aluminium blanc*, ont tendance à se fracturer plus facilement.

FRACTURE DE L'AGGLOMERANT (iii)

La fracture de l'agglomérant correspond à une usure de la meule par fracture des piliers d'agglomérant. Elle se produit lorsque les contraintes sur l'abrasif dépassent la résistance des piliers d'agglomérant. Les meules tendres sont davantage sujettes à la fracture de l'agglomérant, car elles ont moins de liant pour maintenir la cohésion des grains.



Ci-dessus : les trois types d'usure de meule. L'usure par abrasion conduit à un fort dégagement de chaleur et une élévation de température. Elle doit être contrebalancée par le juste degré de fracture d'abrasif et de fracture d'agglomérant, qui permettra d'obtenir une meule auto-affûtante.

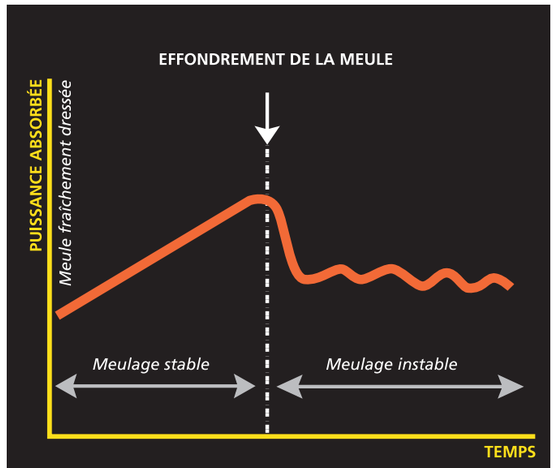
Ci-contre [à droite] : Un grain d'abrasif émoussé. Un émoussage important a pour conséquence une forte élévation de température et conduit à la brûlure. Cette meule à agglomérant vitrifié, de grain 46 et de grade N, était trop dure pour l'usage qui en a été fait.

Dans une meule fonctionnant correctement, les contraintes plus élevées qui agissent sur les grains émoussés (usure de *type i*) sont équilibrées par la résistance de l'abrasif et la résistance des piliers d'agglomérant, de telle sorte que les grains émoussés se détachent, mettant à jour de nouvelles arêtes coupantes. Ceci est réalisé soit par fracture de l'abrasif (usure de *type ii*), soit par rupture du liant (usure de *type iii*). Ce type de meule est qualifiée "d'auto-affûtante" ou "à coupe franche". Pour les meules qui perdent leur pouvoir de coupe trop rapidement, le taux de fracture de l'abrasif et de fracture de l'agglomérant peut être réduit en diminuant l'épaisseur du copeau [page 21].

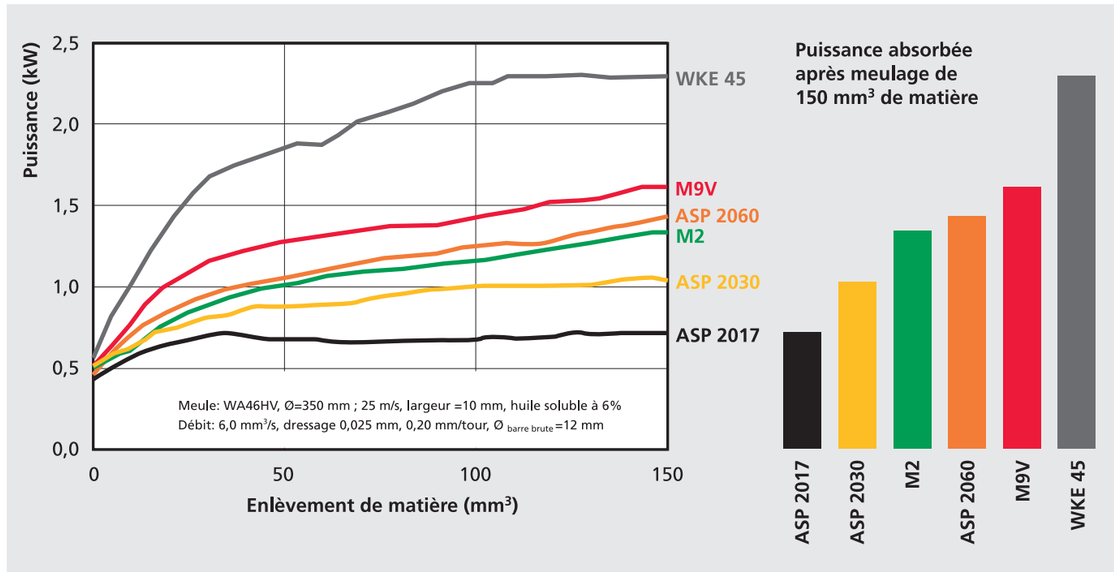
Dans des conditions d'auto-affûtage défavorables, les forces agissant sur les grains d'abrasif atteignent un point critique, et l'usure de la meule devient extrême et instable (cf graphe ci-contre). A ce stade, la meule "s'effondre" et perd de sa *circularité*, ce qui entraîne des vibrations de la machine et un meulage instable. Les opérations de meulage ne devraient jamais atteindre ce stade. Les nuances fortement alliées usent les meules rapidement, et atteignent ce stade critique d'effondrement plus rapidement. Enfin, les opérations de meulage avec encrassement sont particulièrement sujettes à ce phénomène.

COMPOSITION DE L'ACIER ET RECTIFICATION

Le niveau d'usure d'une meule dépend des conditions de rectification, mais aussi de la composition de l'acier. En raison de leur dureté élevée et de leur grand nombre de carbures très durs, la rectification des aciers fortement alliés entraîne un émoussage rapide de la meule et une puissance absorbée importante. Par exemple, comme le montre la figure, les nuances fortement alliées commencent avec à peu près le même niveau de puissance absorbée que les nuances peu alliées. Cependant, tandis que le meulage progresse, l'absorption de puissance des nuances fortement alliées augmente beaucoup plus rapidement. Après un certain temps, la puissance absorbée d'une nuance donnée peut être plusieurs fois supérieure à celle d'une autre.



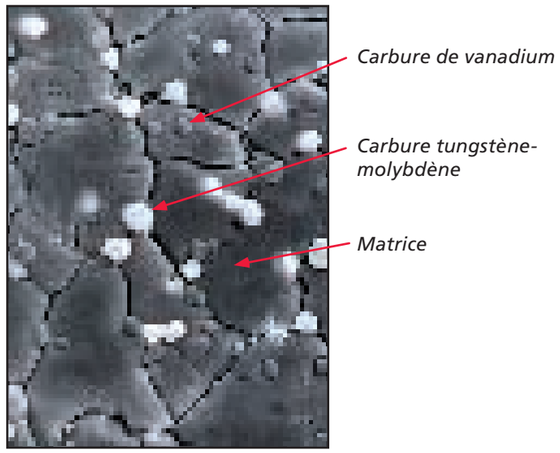
Puissance absorbée (ou encore, forces et dégagement de chaleur) en fonction du temps au cours du meulage. Après dressage, la meule commence à s'émousser. A partir du moment où les forces sur la meule atteignent une valeur critique, l'usure devient très rapide et la meule s'effondre. A ce moment, la meule perd de sa circularité et la rectification devient instable. Des facettes apparaissent et l'état de surface est mauvais. La meule doit être dressée avant d'atteindre ce stade.



Qu'ils soient faiblement ou fortement alliés, les aciers génèrent approximativement la même puissance absorbée avec une meule coupante. Cependant, avec les aciers fortement alliés, la meule perd son pouvoir de coupe plus rapidement. Il en résulte une usure excessive de la meule et, comme le montre cette figure, une augmentation de la puissance absorbée. Par conséquent, le risque de brûlure augmente.

COMPOSITION DE L'ACIER RAPIDE ET RECTIFICATION

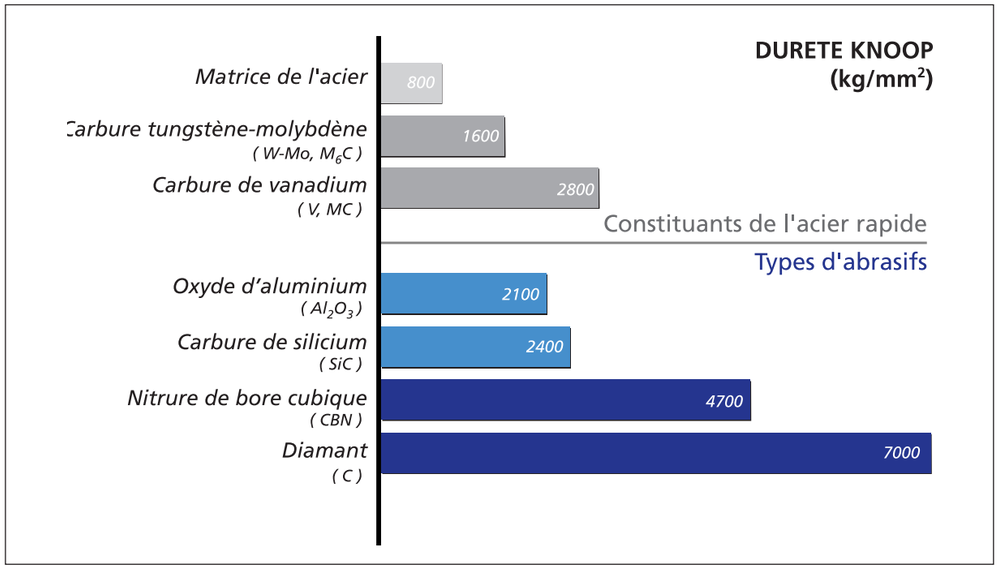
L'acier rapide est composé de deux constituants principaux : une matrice fer-carbone alliée et des carbures. Le tungstène, le molybdène et le vanadium se combinent au carbone pour former des carbures de haute dureté. Comme le montre la figure page suivante, ces carbures peuvent avoir la même dureté (voire une dureté plus élevée) que les grains d'abrasif, entraînant une perte de coupe et des fractures d'abrasif/d'agglomérant. En général, plus la teneur en éléments d'alliages est élevée, plus la quantité de carbures est importante, et moins bonne est la meulabilité.



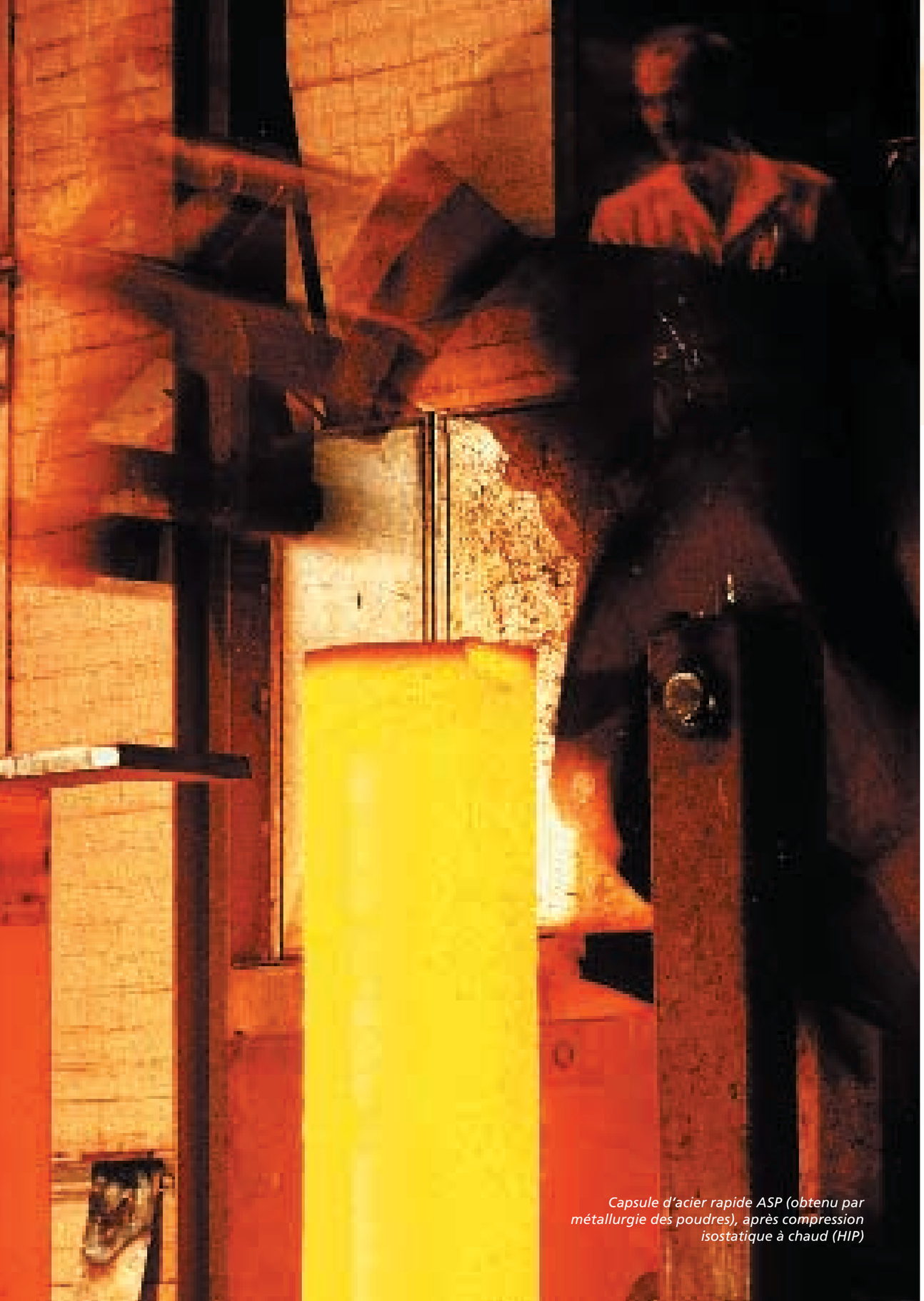
Les carbures et la matrice d'un acier rapide ASP 2030 obtenu par métallurgie des poudres.

Tranchant d'un couteau en ASP 2053. Les carbures confèrent au couteau sa résistance à l'usure, mais le rendent aussi difficile à meuler.

La rectification des aciers peu alliés est généralement beaucoup plus facile: la meule conserve son pouvoir de coupe plus longtemps. La rectification des aciers fortement alliés, avec leur très forte teneur en carbures très durs, pose des problèmes tout à fait particuliers. C'est pourquoi un choix approprié de meule, de conditions de dressage, de liquide de refroidissement et de paramètres de rectification est primordial pour obtenir de hauts débits avec un échauffement minimal. Néanmoins, même les opérations de rectification bien optimisées peuvent conduire à des *dommages thermiques*, souvent appelés *brûlures de rectification*, quand elles sont poussées vers leurs limites pour des raisons de productivité. Il est donc important de comprendre les différents types de dommages thermiques susceptibles de se produire, à quel moment ils apparaissent, comment ils peuvent être détectés, et quelles stratégies permettent de les réduire.



Dureté des constituants de l'acier rapide et de différents types d'abrasifs.



Capsule d'acier rapide ASP (obtenu par métallurgie des poudres), après compression isostatique à chaud (HIP)

DOMMAGES THERMIQUES ET BRULURES

La brûlure de rectification est un terme général utilisé pour décrire tout type de dommage thermique affectant la pièce au cours du meulage. En fait, il existe plusieurs types de dommages thermiques ; chacun se produit dans un intervalle de température différent et affecte la qualité de la pièce de manière différente.

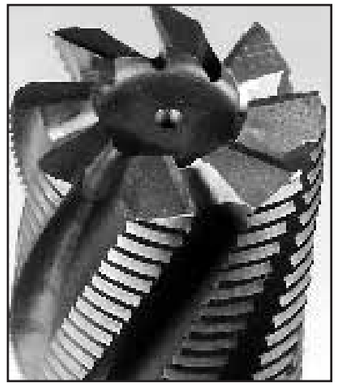
LES QUATRE TYPES DE DOMMAGES THERMIQUES SONT LES SUIVANTS:

Type 1 : Brûlure d'oxydation

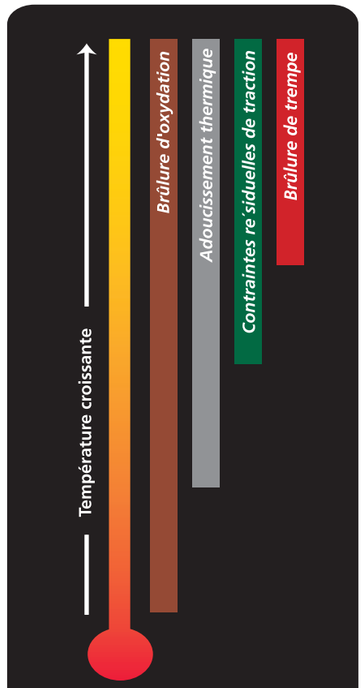
Type 2 : Adoucissement thermique

Type 3 : Contraintes résiduelles de traction

Type 4 : Brûlure de trempe



La plupart des types de dommages thermiques ne présentent pas de marques visibles sur la pièce.



Les quatre types de dommages thermiques et les intervalles de température relatifs dans lesquels ils se produisent.

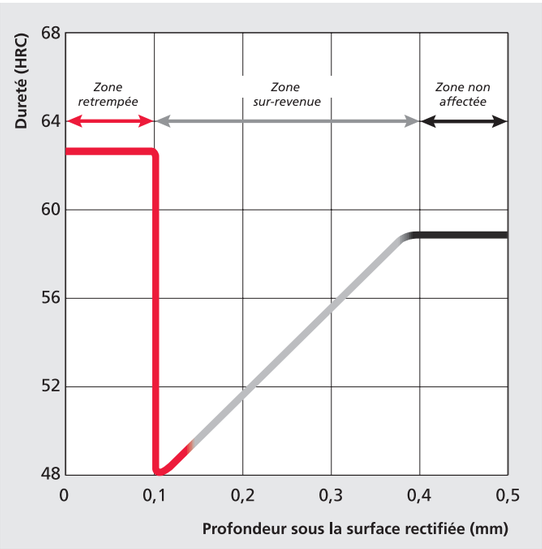
TYPE 1: BRULURE D'OXYDATION

La *brûlure d'oxydation* est due à l'oxydation de la pièce et/ou du liquide de refroidissement, et laisse une fine couche colorée sur la surface rectifiée. Elle peut également se produire sur la surface non rectifiée à proximité de la zone de meulage, où les températures sont élevées en raison de la conduction thermique. La brûlure d'oxydation est parfois purement superficielle et se produit souvent sans conséquences métallurgiques néfastes pour la pièce, bien que cette fine couche risque de rendre difficile tout revêtement ultérieur. Bien que la brûlure d'oxydation devienne généralement plus sévère aux températures élevées, sa présence ne permet pas de savoir si d'autres types de dommages thermiques se sont produits ou non.

TYPE 2: ADOUCISSEMENT THERMIQUE

L'*adoucissement thermique* (ou *sur-revenu*) se produit lorsque la température de la pièce dépasse la température de revenu. Il engendre une couche de matériau sur-revenu, avec une dureté réduite. Cela peut affecter la résistance et la performance de l'outil.

La figure ci-dessous montre comment la dureté de la pièce est influencée par les dommages thermiques, en fonction de la profondeur sous la surface. Elle montre deux types de dommages thermiques. Tout d'abord, jusqu'à 0,1 mm sous la surface (en rouge), il s'agit d'une zone de brûlure de trempe (type 4), la dureté est augmentée. Puis, de 0,1 à 0,4 mm de profondeur (en gris), il s'agit d'une zone d'adoucissement thermique (type 2), la dureté est réduite. Au-delà de 0,4 mm de profondeur (en noir), la dureté de la pièce n'est pas affectée. Bien que *les deux types de brûlures (adoucissement thermique et brûlure de trempe)* soient visibles ici, *l'adoucissement thermique peut se produire en l'absence de brûlure de trempe,* car l'adoucissement thermique commence à apparaître à une température plus basse.



Dureté en fonction de la profondeur, montrant les dommages thermiques de types 4 et 2. En surface, une couche retrempée; en-dessous, une couche de matériau sur-revenu.

Brûlure d'oxydation sur un taraud. La surface présente un changement de couleur en raison de la conduction de chaleur provenant de la rectification du filetage. Cela ne permet pas de savoir si d'autres types de dommages thermiques sont présents.

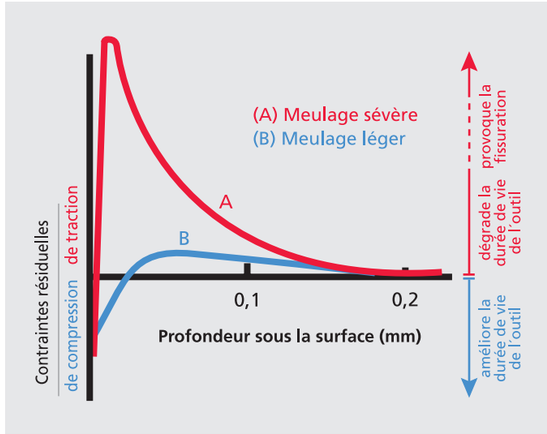
TYPE 3: CONTRAINTES RESIDUELLES DE TRACTION

Au cours d'un meulage léger, la déformation plastique de la pièce due à l'action des grains d'abrasif laisse la surface dans un état de *contraintes résiduelles de compression*. Tout comme le grenaillage, cela peut améliorer les propriétés du matériau de la pièce, notamment sa durée de vie en fatigue. Cependant, lorsque le débit augmente, la température s'élève et des *contraintes résiduelles de traction* commencent à apparaître.

Les contraintes résiduelles de traction sont provoquées par la déformation plastique du métal sous l'effet de la dilatation thermique de la surface pendant la rectification. Après refroidissement, la surface est en traction. Dans les cas modérés, les contraintes résiduelles de traction affectent négativement la durée de vie de l'outil. Dans les cas extrêmes, elles engendrent la fissuration de l'outil après rectification. La profondeur et la sévérité de la fissuration dépendent de la température atteinte et des propriétés du matériau de la pièce. En supposant qu'il n'y ait pas de fissures, les contraintes résiduelles peuvent être diminuées par une opération de revenu après la rectification. Les méthodes utilisées pour la détection des contraintes résiduelles de traction sont la diffraction X, l'attaque acide et l'effet Barkhausen.

TYPE 4: BRULURE DE TREMPE

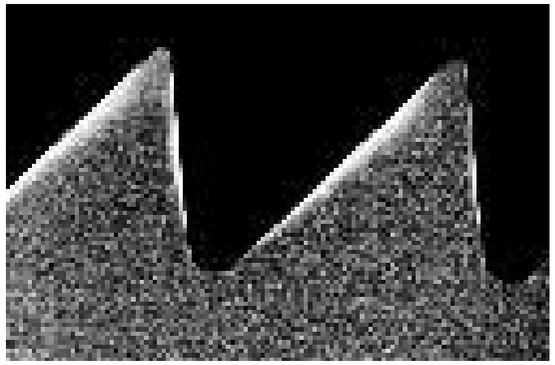
La *brûlure de trempe* se produit lorsque la température de la pièce dépasse la température d'austénitisation, ce qui provoque un changement de phase métallurgique dans le matériau lors du refroidissement. Le résultat est une fine couche de *martensite non revenue, dure et fragile*. Cet état est encore accentué par des contraintes résiduelles secondaires, qui apparaissent avec le changement de masse volumique du matériau nouvellement formé. Il s'agit de la forme la plus sévère de dommages thermiques, qui conduit souvent à la fissuration de l'outil.



Contraintes résiduelles en fonction de la profondeur dans la pièce. Les contraintes résiduelles sont présentes dans toutes les pièces rectifiées. Les contraintes résiduelles de compression améliorent la durée de vie de l'outil. Les contraintes résiduelles de traction dégradent la durée de vie de l'outil et peuvent causer des fissurations immédiates.

REDUCTION DES DOMMAGES THERMIQUES

Même dans des conditions de rectification bien optimisées, la recherche de hauts débits signifie qu'il y a toujours un risque de provoquer des dommages thermiques. La difficulté réside dans l'obtention de hauts débits et d'une qualité constante, tout en maintenant des températures basses. Des températures réduites peuvent être obtenues soit *(i) en diminuant la génération de chaleur, soit (ii) en diminuant la quantité de chaleur pénétrant dans la pièce,* par exemple, grâce à un refroidissement efficace. Les sections suivantes expliquent quelques concepts fondamentaux en rectification en relation avec le rendement et la génération de chaleur, et donnent des recommandations pour améliorer la performance et diminuer le risque de dommages thermiques.



Brûlure de trempe dans une fraise à fileter. Les zones blanches révèlent les endroits où un changement de phase s'est produit.

Les premières meules : pierres meulières à Stanage Edge. Peak District, Angleterre.

LE FLUIDE DE COUPE

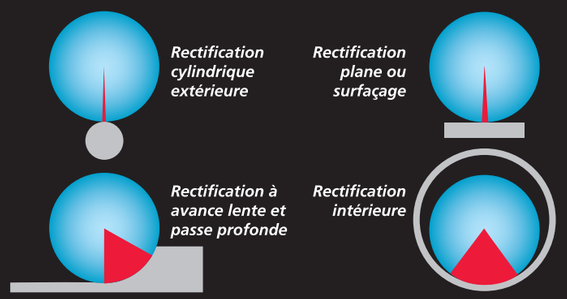
Le fluide de coupe a trois rôles essentiels:

- ***Lubrifier l'interface abrasif-pièce***
- ***Refroidir la pièce***
- ***Evacuer les copeaux***

En général, *les émulsions aqueuses* fournissent un *bon refroidissement mais une mauvaise lubrification*, tandis que *les huiles de coupe entières* fournissent une *bonne lubrification mais un refroidissement médiocre*. On préfère souvent les émulsions pour des raisons liées à l'hygiène et à l'environnement.

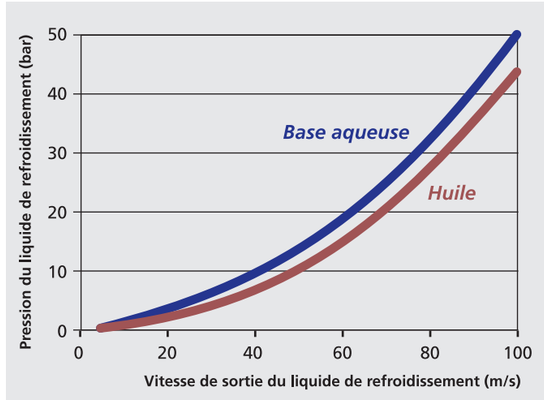
L'efficacité du refroidissement dépend surtout de la longueur de l'arc de contact. Les opérations de rectification avec un *grand arc de contact*, telles que la rectification à avance lente et passe profonde, ont une grande surface de contact favorisant l'apport de chaleur par convection directement au fluide de coupe. Dans ce cas, le fluide de coupe absorbe une grande partie de la chaleur. Ce type d'opérations tire un grand profit d'un refroidissement efficace. Les opérations avec un *arc de contact plus court*, telles que la rectification cylindrique extérieure, ont une surface de contact plus réduite pour la convection. En conséquence, le fluide de coupe absorbe seulement une petite partie de la chaleur. Pour ces applications, l'efficacité du refroidissement n'a pas autant d'importance: le liquide de coupe sert surtout à la lubrification.

Les opérations avec un grand arc de contact sont favorisées par un refroidissement efficace. De plus, le grade optimal de meule dépend fortement de la longueur de l'arc de contact. Un grand arc de contact permet de distribuer les forces sur une plus grande surface de contact, ce qui signifie des forces par grain d'abrasif réduites et, ainsi, une meule plus tendre peut être utilisée.

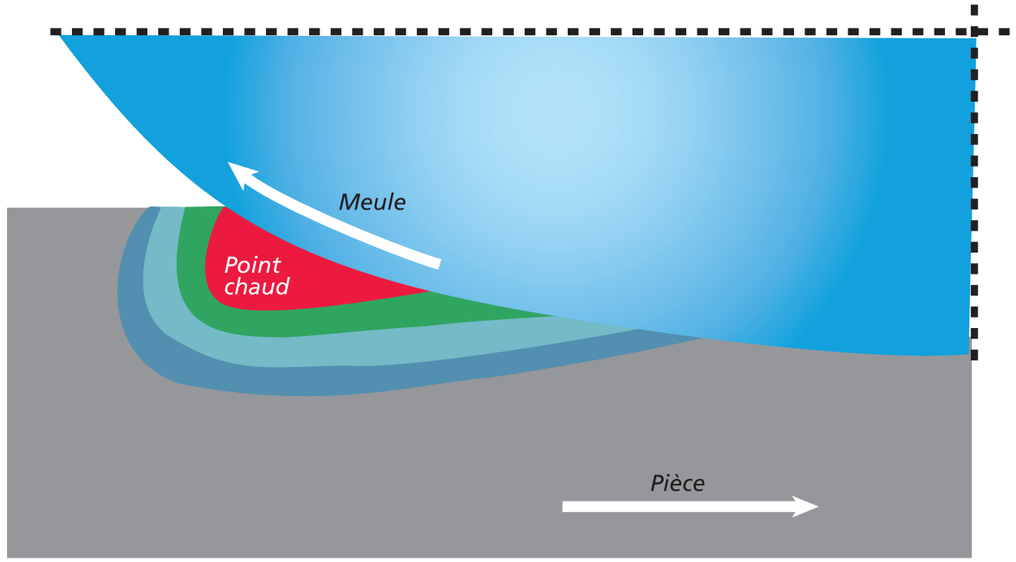


Le *point chaud* est la zone de la pièce à l'interface meule-pièce où les températures sont les plus élevées. L'efficacité du refroidissement dépend du fait que le liquide de refroidissement brise le *film d'air* entourant la meule et pénètre dans le *point chaud* au niveau de la surface de contact. Ceci est réalisé en ayant un liquide de refroidissement dont la vitesse d´injection est proche de celle de la meule, de sorte que le liquide pénètre la couche d'air. Ceci signifie qu'il est plus important d'avoir une buse bien dirigée et une vitesse de sortie du liquide de refroidissement élevée qu'un haut débit de liquide de refroidissement. Des vitesses de coupe élevées nécessitent de fortes pressions (voir figure). Par conséquent, il est important que la buse du système de refroidissement soit bien conçue. Son orifice doit être dimensionné de manière appropriée. Un orifice trop ouvert entraînera une chute de pression dans le système, ce qui conduira à des vitesses de sortie trop faibles.

Une autre technique est de forcer le liquide de refroidissement à pénétrer dans les porosités de la meule, de sorte que la meule l'entraîne dans l'arc de contact à la vitesse de la meule. Cependant, cette méthode peut être difficile à mettre en œuvre, et nécessite plus de puissance machine pour accélérer le liquide de refroidissement.



Pression du liquide de refroidissement en fonction de sa vitesse de sortie. Pour un refroidissement efficace, la vitesse de sortie du liquide de refroidissement doit correspondre à la vitesse périphérique de la meule.



Le point chaud est la zone dans laquelle les températures sont les plus élevées. Pour un refroidissement efficace, il est nécessaire que le liquide de refroidissement pénètre entre les grains, permettant ainsi à la meule d'entraîner le liquide de coupe vers le point chaud.

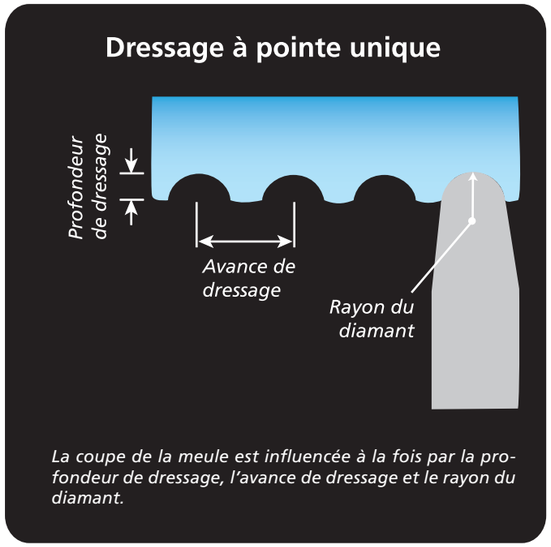
DRESSAGE ET MISE AU ROND

La préparation de la meule avant la rectification inclut la mise au rond et le dressage. La mise au rond consiste à enlever de la matière de façon à ce que la meule soit centrée, qu'elle "tourne rond". Elle peut également inclure une opération de profilage pour donner à la meule la forme désirée. Le dressage fait référence au procédé visant à donner à la surface active de la meule un relief spécifique, afin d'obtenir le comportement désiré en rectification.

Pour les meules superabrasives à liant résine, la mise au rond et le dressage sont normalement effectués séparément. Dans la plupart des autres cas, ils sont réalisés lors d´une même opération, que l'on appelle souvent simplement dressage. Il existe différentes méthodes de dressage. Les deux plus fréquentes sont le dressage à *pointe unique* et le dressage par *molette rotative*.

Dans le *dressage à pointe unique,* le relief final dépend de la *profondeur et de l'avance de dressage,* ainsi que du *rayon du diamant*. Plus la *profondeur et l'avance de dressage sont grandes* et plus la surface de la meule est rugueuse. Cependant, *l'avance* a souvent un effet plus significatif, et elle est souvent négligée. Lorsqu'elle est utilisée de manière appropriée, l'avance peut également créer une *hélice sur la meule,* qui facilite l'écoulement du liquide de refroidissement. Le *rayon du diamant* de dressage est également important et souvent négligé. Après des usages répétés, le diamant s'émousse et son rayon augmente, ce qui conduit à une meule ayant moins de coupe. Par conséquent, le diamant de dressage doit être tourné fréquemment pour maintenir la coupe. Comme autre solution, on peut utiliser des diamants multipointes (plaquettes, dresseurs multipointes, etc.) qui sont souvent avantageux et mieux adaptés à la production automatisée.

Le *dressage à molette rotative* utilise une molette constituée de particules de diamant imprégnées dans une matrice métallique. Ce type de dressage est souvent utilisé pour générer des profils. De nombreux paramètres influent sur les performances. Ce sont la *profondeur de dressage,* l'*avance par tour de meule,* le *planage,* et le *rapport de vitesses*. *Une grande avance par tour* (encore appelée *vitesse de plongée*) donne une meule *"agressive"* ou *"ouverte"*. Le *planage* agit de la même façon qu'une passe de finition en rectification, produisant une meule plus lisse. Le *rapport de vitesses* est le rapport vitesse de l'outil de dressage sur vitesse de la meule. Une valeur positive signifie qu'ils se déplacent dans la même direction. Une valeur de +1 signifie que les vitesses sont les mêmes, produisant un *effet d'écrasement*. Des tests ont montré que dans de nombreux cas, un rapport de vitesse de +0,8 permet un dressage optimal, produisant une meule "ouverte".



La coupe de la meule est influencée à la fois par la profondeur de dressage, l'avance de dressage et le rayon du diamant.

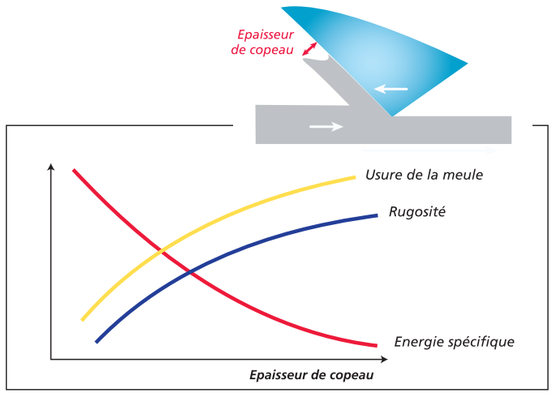
DEBIT MATIERE ET EPAISSEUR DU COPEAU

Le débit matière, encore appelé taux d'enlèvement, fait référence à la quantité de matière enlevée par unité de temps (exprimée en mm³/s). Augmenter la profondeur de coupe, la vitesse de la pièce ou la largeur de coupe revient à augmenter le débit. En pratique le débit est le plus haut possible, afin d'obtenir des niveaux de production élevés.

Le débit matière est souvent donné par unité de largeur de meule, et est désigné sous le nom de *débit spécifique* (exprimé en $mm^3/mm/s$). Augmenter *le débit specifique* revient à augmenter l'épaisseur du copeau.

L'*épaisseur du copeau* est l'épaisseur moyenne des copeaux formés. Bien que les copeaux enlevés pendant la rectification aient une forme irrégulière, l'épaisseur moyenne du copeau restera relativement constante, dans des conditions données. On obtient un copeau plus épais en:

- **augmentant la *profondeur de coupe***
- **augmentant la *vitesse de la pièce***
- **diminuant la *vitesse de la meule***



L'épaisseur de copeau a une influence importance sur la rectification Elle peut être changée afin d'obtenir le résultat souhaité.

En général, une forte épaisseur de copeau correspond à:

- **un état de surface grossier**
- **une augmentation de l'usure et de la perte de forme de la meule**
- **un bon auto-affûtage de la meule**
- **une énergie spécifique inférieure**

L'*énergie spécifique* est la chaleur dégagée par unité de volume de matière enlevée (exprimée en $Joules/mm^3$). Les opérations de rectification à faible énergie spécifique ont une action efficace et génèrent moins de chaleur. Les meules coupantes produisent *moins d'énergie spécifique* et de chaleur en raison de la part importante prise par la *coupe* comparée à celle prise par le *repoussage* et la *friction*.

La puissance (et la chaleur) générée pendant le meulage est le produit du débit par l'*énergie spécifique*.

Puissance (W) = débit (mm^3/s) x énergie spécifique (J/mm^3)

Par conséquent, la chaleur dissipée dans la pièce pendant la rectification peut être diminuée :
(1) En diminuant *le débit spécifique* (meulage plus léger)
(2) En diminuant *l'énergie spécifique* (copeau plus épais, meule plus coupante, dressage plus grossier, etc.)

Par exemple, la réduction de la vitesse de la meule entraîne une épaisseur de copeau plus grande et donc, une énergie spécifique plus faible et moins de dégagement de chaleur. La contrepartie est davantage d'usure (et d'auto-affûtage) et un aspect de surface plus rugueux. Par opposition, une *vitesse de pièce* réduite produit une épaisseur de copeau plus faible et un état de surface plus fin.

Laminage d'acier rapide

MEULABILITE

Le terme "meulabilité" est utilisé pour décrire l'aptitude d'un matériau à être meulé. En raison de leurs différences de composition et de dureté, le comportement en rectification des différentes nuances d'aciers rapides peut varier de manière significative si l'on considère leur facilité ou leur difficulté à être rectifiées.

La *meulabilité* peut englober la *sensibilité* du matériau aux dommages thermiques à haute température du fait de ses propriétés métallurgiques. Plus important, la *meulabilité* est mieux décrite par le rendement, encore appelé *G ratio,* en particulier lorsque l'on rectifie avec des *abrasifs conventionnels*. Le G ratio est défini comme le *volume de matière enlevé pendant la rectification divisé par la perte de volume de la meule*.

Le G ratio traduit surtout l'effet de la composition chimique de l'acier rapide sur les propriétés de coupe des grains d'abrasif, plutôt que le coût d'utilisation de la meule. Les aciers fortement alliés ont tendance à émousser la meule rapidement du fait de leurs nombreux carbures très durs, ce qui entraîne une augmentation de la chaleur dégagée et de l'usure de la meule. Cela donne un *G ratio plus faible,* et une *moins bonne meulabilité*. Les matériaux avec un faible G ratio nécessitent des *vitesses et des avances réduites,* ainsi qu'un dressage fréquent (pour leur conserver leur coupe et leur profil). Les temps de cycle s'en trouvent allongés. Les aciers peu alliés ont un G ratio plus élevé: on peut utiliser des *vitesses et des avances plus élevées,* en raison du faible niveau d'émoussage et d'usure de la meule. Elles ont moins souvent besoin d'être dressées. Cela a pour conséquences des temps de cycles plus courts et un meilleur contrôle de la qualité de la pièce.

Pour ces raisons, les *meules CBN* sont souvent utilisées pour les matériaux fortement alliés dont la meulabilité est mauvaise. Les grains CBN sont bien plus durs que les carbures de l'acier, et la meule conserve ainsi sa coupe. De plus, le CBN possède une plus grande conductibilité thermique. Par conséquent, la chaleur est transportée par conduction de la pièce vers la meule, réduisant ainsi le risque de dommages thermiques.

Le diagramme à la fin de cette brochure compare la meulabilité des nuances Erasteel, basée sur des essais de G ratio et sur l'expérience pratique. Comme le G ratio est un *paramètre du procédé,* il dépend de nombreuses variables. Néanmoins, dans la pratique, le classement relatif des différentes nuances en fonction de la meulabilité restera en général constant. Par conséquent, les valeurs de meulabilité sont données par rapport au M2. Ce classement concerne la rectification avec des *abrasifs conventionnels*. En pratique, lors de la rectification avec des *superabrasifs,* l'écart de meulabilité entre les différentes nuances est plus faible.

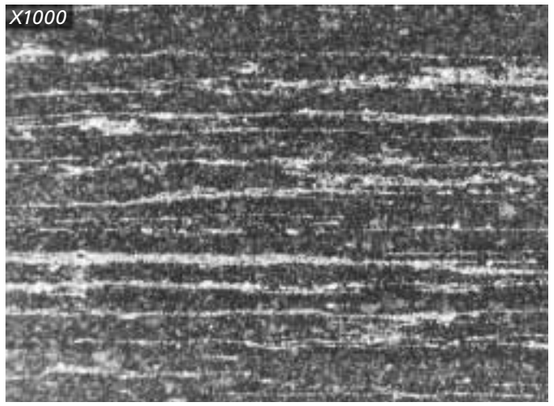
RECTIFICATION DES ACIERS RAPIDES ASP®

Les différences de caractéristiques métallurgiques entre les aciers rapides produits selon la méthode conventionnelle et les aciers rapides ASP® produits par la métallurgie des poudres impliquent des différences significatives de comportement pendant la rectification.

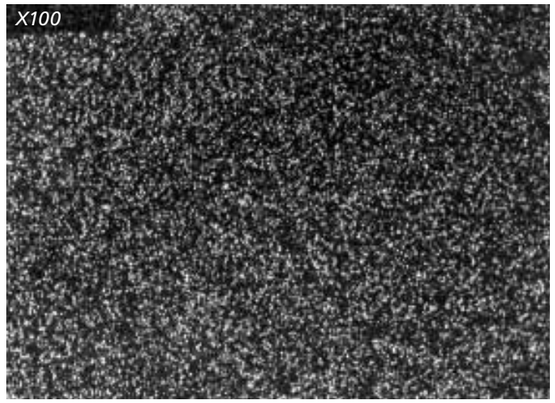
Lorsqu'il est produit par la méthode conventionnelle, l'acier rapide contient de gros carbures qui émoussent la meule. Ce problème est encore exacerbé par le phénomène de ségrégation, les carbures formant de gros amas au cours de la solidification.

Lorsqu'il est produit par la méthode de la métallurgie des poudres (qualité **ASP®**), l'acier rapide contient des carbures beaucoup plus petits. Pendant la rectification, cela se traduit par une meule qui reste coupante et qui s'use moins. De plus, les vitesses de solidification élevées de la métallurgie des poudres permettent de garantir l'absence de ségrégation dans l'acier, ce qui aboutit à une distribution homogène des carbures.

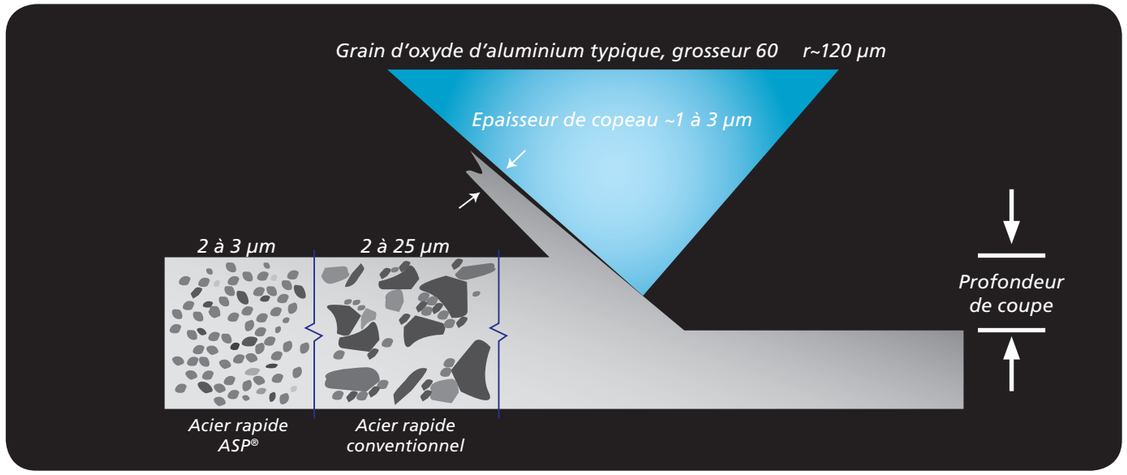
Ceci signifie que, pour une teneur en éléments d'alliage donnée, les aciers rapides produits par la métallurgie des poudres sont plus faciles à rectifier que les aciers rapides produits par la méthode conventionnelle. Cet avantage relatif augmente lorsque la teneur en éléments d'alliage augmente. Le bénéfice est beaucoup plus net pour la rectification avec des abrasifs conventionnels que pour la rectification avec des superabrasifs.



L'acier rapide conventionnel contient de gros carbures répartis de manière hétérogène, en bandes.



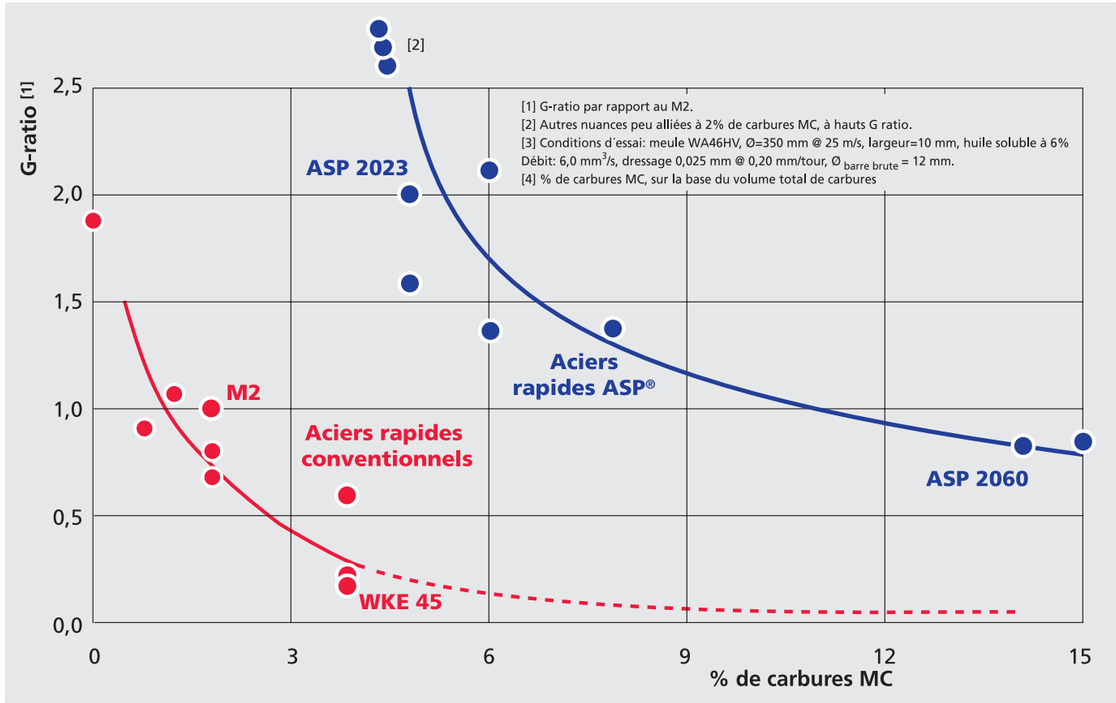
L'acier rapide ASP® possède de petits carbures, distribués de manière homogène.



Taille des grains d'abrasif, des carbures et du copeau, lors de la rectification d'acier rapide ASP® et d'acier rapide conventionnel.

Avec le développement de la métallurgie des poudres, les aciers rapides peuvent maintenant être produits avec une plus haute teneur en éléments d'alliage, tirant avantage de leur meilleure résistance à l'usure grâce aux carbures, tout en gardant une bonne résilience. Dans les deux cas, la meulabilité diminue lorsque la teneur en éléments d'alliage augmente. Néanmoins, l'acier rapide **ASP®** a une meilleure meulabilité que l'acier conventionnel, pour une teneur en éléments d'alliage donnée.

Le graphe ci-dessous montre l'effet de la teneur en éléments d'alliage sur le G ratio à la fois pour l'acier rapide **ASP®** et pour l'acier rapide conventionnel. Par exemple, l'ASP 2023 est souvent utilisé comme une version améliorée du M2. Sa teneur en carbures, et notamment en carbures de vanadium (les plus durs), est très supérieure à celle du M2. Malgré cela, l'ASP 2023 est plus facile à rectifier que le M2.



G ratio en fonction du pourcentage de carbures MC (carbures de vanadium), très durs. Pour une teneur en carbures donnée, l'acier obtenu par métallurgie des poudres est toujours plus facile à rectifier que l'acier obtenu de manière conventionnelle.

Coulée d'acier rapide

CHOIX DE LA MEULE

Le choix d'une meule adaptée pour un procédé donné dépendra de nombreux facteurs, tels que le matériau et la taille de la pièce, la rigidité du montage, les vitesses et les avances, les conditions de dressage, l'application d'un liquide de refroidissement, l'état de surface et les tolérances exigés, etc.

Les meules données dans le tableau suivant ont été regroupées selon les recommandations des fabricants de meules. Ces recommandations doivent être considérées comme des points de départ. Une optimisation plus fine doit être menée, en collaboration avec le fournisseur d'acier, en tenant compte des caractéristiques spécifiques de chaque procédé de rectification. Les fabricants de meules recensés dans le tableau ci-dessous sont SlipNaxos[1], Norton[2] et Tyrolit[3].

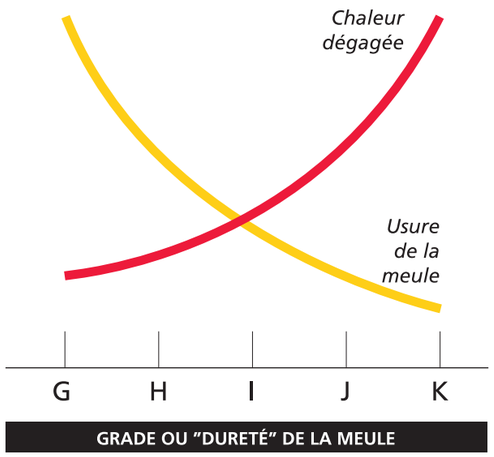
	FAIBLEMENT ALLIÉ (M50) (ASP 2017)	MOYENNEMENT ALLIÉ (M2) (ASP 2030)	FORTEMENT ALLIÉ (WKE 45) (ASP 2060)
Rectification de gorges de forets	B91 R100 B3[1] 57A 100U B[2] M10A 802S 8 B25[3]	B91 R100 B3[1] 23A 100U B[2] M10A 802S 8 B25[3]	B91 R100 B3[1] SG 100U B[2] M10A 802S 8 B25[3]
Détalonnage	B91 R100 B3[1] M10A 802S 8 25[3]	B91 R100 B3[1] M10A 802 S8 B25[3]	B91 R100 B3[1] M10A 802 S8 B25[3]
Rectification de filetages	48A 100 G VZ[1] 430A 100 G VQP[1]* 38A 100L V[2] 86A 100L V[2] 89A 1802 J2 V112[3]	48A 100 G VZ[1] 430A 100 G VQP[1]* 32A 100L V[2] 89A 1802 J2 V112[3]	48A 100 G VZ[1] 430A 100 G VQP[1]* SG or TG 100L V[2] 89A 1802 J2 V112[3]
Rectification de pointes	B91 R100 B6[1] 57A 100U B[2]	B91 R100 B6[1] 23A 100U B[2]	B91 R100 B6[1] SG 100U B[2]
Rectification centerless	53A 60 L VZ[1] 820A 60 L VQ[1]* 57A 60L V[2] 64A 60L V[2]	53A 60 L VZ[1] 820A 60 L VQ[1]* 23A 60L V[2] 53A 60L V[2]	53A 60 L VZ[1] 820A 60 L VQ[1]* SG or SGP 60L V[2]
Rectification cylindrique	48A 54 J VZ[1] 420A 54 J VQ[1]* 99A 802 K5 V121[3]	48A 54 J VZ[1] 420A 54 J VQ[1]* 99A 802 K5 V121[3]	48A 54 J VZ[1] 420A 54 J VQ[1]* 99A 802 K5 V121[3]
Rectification intérieure (alésages)	48A 80 J9 VZ[1] 420A 80 J9 VZ[1]* 32A 100K V[2] 32AA 100K V[2] 51B 91C 75 B75[3]	48A 80 J9 VZ[1] 420A 80 J9 VZ[1]* SG 100K V[2] 51B 91C 75 B75[3]	48A 80 J9 VZ[1] 420A 80 J9 VZ[1]* SG or TG 100K V[2] 51B 91C 75 B75[3]
Rectification plane ou surfaçage	48A 46 G VZ[1] 420A 46 G12 VQP[1]* 53A 60J V[2] 51B 126 C50 B54 VIB[3]	48A 46 G VZ[1] 420A 46 G12 VQP[1]* 32A or 32AA 60J V[2] 51B 126 C50 B54 VIB[3]	48A 46 G VZ[1] 420A 46 G12 VQP[1]* SG or TG 60J V[2] 51B 126 C50 B54 VIB[3]

**pour utilisation avec des machines rigides*
Pour certaines opérations, les fabricants de meules ont donné plus d'un choix

[1] SlipNaxos
[2] Norton
[3] Tyrolit

PROBLEMES, CAUSES ET REMEDES

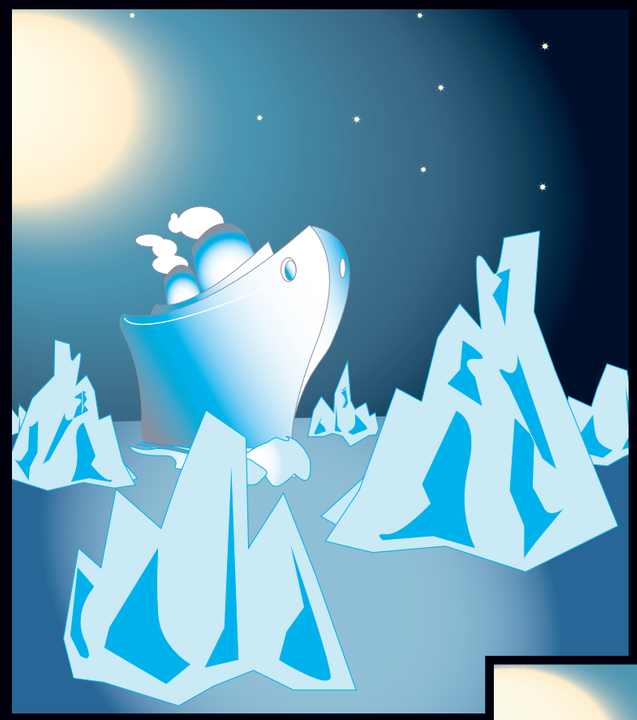
La rectification est un procédé extrêmement complexe, avec de nombreuses variables interdépendantes. Le tableau ci-dessous sert de guide pour aborder les problèmes habituels rencontrés pendant la rectification. Il donne le symptôme, la cause possible, et le remède, ainsi que des commentaires et d'éventuels effets secondaires que l'ingénieur doit prendre en compte. En fait, il y a souvent plus d'une raison à un problème particulier, et plusieurs solutions possibles.



Des choix corrects en rectification impliquent souvent de trouver un équilibre entre les paramètres. Par exemple, les meules "dures" tendent à mieux conserver leur profil mais risquent de provoquer plus de brûlures du fait d'un dégagement de chaleur excessif.

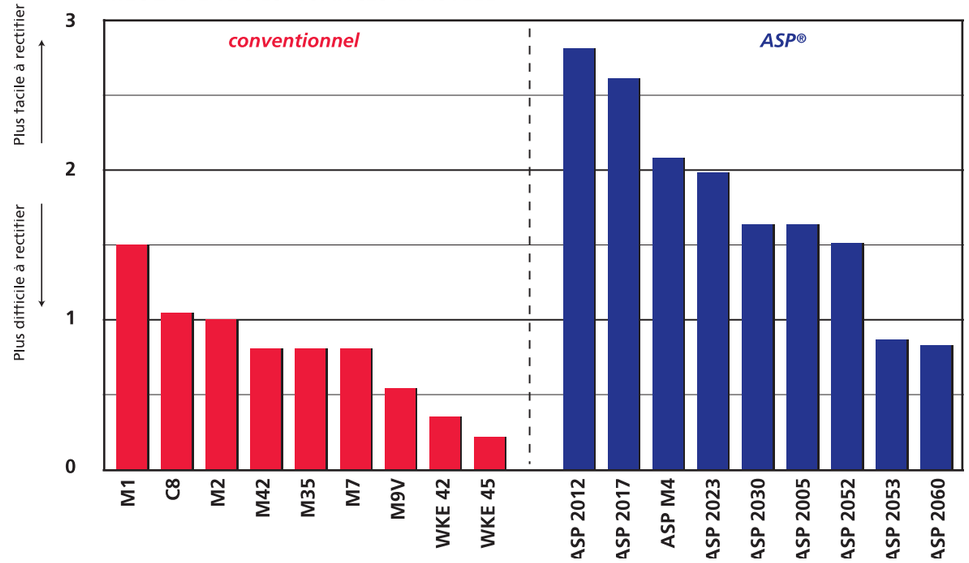
SYMPTOME	CAUSE POSSIBLE	REMEDE	COMMENTAIRES, EFFETS SECONDAIRES EVENTUELS
Facettes, vibration de la machine	Paliers usés	Remplacer les paliers	
	Rigidité machine médiocre	Utiliser des paliers/un montage machine/un support outil plus rigides	
	Meule déséquilibrée	Equilibrer la meule	
	Meule en faux rond	Dresser la meule	La meule a peut-être atteint le stade d'effondrement [page 9]
	Meule trop "dure"	Utiliser une meule à grade plus "tendre"	Risque : moins bon état de surface, perte de profil
		Utiliser un abrasif plus friable ou un abrasif Sol-Gel	Risque : avec un abrasif plus friable, moins bon état de surface, perte de profil
		Augmenter le débit spécifique (en particulier la vitesse de la pièce)	Augmente l'épaisseur du copeau pour induire l'auto-affûtage de la meule. Risque : dommages thermiques, état de surface détérioré, perte de profil, efforts plus grands du fait de l'augmentation du débit
	Débit trop élevé	Diminuer le débit	Vitesses et avances plus faibles (meulage plus "léger") pour diminuer les efforts Risque : émoussage de la meule
	Surface de la meule trop lisse	Réaliser un dressage plus grossier, tourner ou changer le diamant de dressage	Risque : état de surface, perte de profil
		Utiliser un grain d'abrasif plus gros	Risque : état de surface, émoussage de la meule (de gros grains rendent la meule plus "dure")

SYMPTOME	CAUSE POSSIBLE	REMEDE	COMMENTAIRES, EFFETS SECONDAIRES EVENTUELS
Brûlure, dommages thermiques, fissures dues aux contraintes résiduelles	Débit trop élevé	Diminuer le débit spécifique [page 21]	Vitesses et avances plus faibles (meulage plus "léger") **Risque:** émoussage de la meule
	Surface de la meule trop lisse	Réaliser un dressage plus grossier, tourner ou changer le diamant [page 20]	**Risque:** moins bon état de surface
		Utiliser des grains d'abrasif plus gros	**Risque:** moins bon état de surface, rayon de courbure minimum
	Meule trop "dure"	Utiliser une meule de grade plus "tendre"	**Risque:** moins bon état de surface, perte de profil
		Utiliser un abrasif plus friable ou un abrasif Sol-Gel	**Risque:** avec un abrasif plus friable, moins bon état de surface, perte de profil
		Augmenter débit spécifique (en particulier la vitesse de la pièce) [page 21]	Augmenter l'épaisseur du copeau pour induire l'auto-affûtage de la meule, en particulier avec les abrasifs friables et céramiques. **Risque:** dommages thermiques dus à un débit excessif, moins bon état de surface, perte de profil.
	Refroidissement médiocre	Augmenter la pression du liquide de refroidissement	Voir chapitre sur le fluide de coupe [page 18]
		Améliorer la position de la buse	Appliquer le liquide de refroidissement au point chaud de l'arc de contact.
		Réduire la taille de l'orifice de la buse	Une section trop grande cause une chute de pression dans le système et une faible vitesse de sortie du liquide de refroidissement.
	Liquide de refroidissement trop chaud	Vérifier la capacité du liquide de refroidissement, réfrigération	
Marques de brûlure colorées sur la surface non-rectifiée	Brûlure d'oxydation	Améliorer le refroidissement global, appliquer une buse supplémentaire directement sur la zone colorée	Refroidir directement la surface s'oxydant et la priver d'oxygène. **Risque:** une buse supplémentaire peut causer une carence du refroidissement principal de l'arc de contact.
État de surface médiocre	Grains trop gros	Réaliser un dressage plus fin	**Risque:** dommages thermiques, facettes
		Utiliser un abrasif plus fin	**Risque:** dommages thermiques, facettes perte de profil
	Meule trop "tendre"	Utiliser une meule de grade plus "dur"	**Risque:** dommages thermiques, facettes
		Utiliser un abrasif plus résistant	**Risque:** dommages thermiques causés par un moins bon auto-affûtage des grains non-friables
	Épaisseur de copeau trop grande	Diminuer l'épaisseur du copeau	L'épaisseur de copeau peut être diminuée en diminuant l'arc de contact ou la vitesse de la pièce, ou en augmentant la vitesse de la meule. **Risque:** endommagement thermique causé par un moins bon auto-affûtage de la meule, notamment avec des abrasifs friables et céramiques SG ; plus grande énergie spécifique. Voir chapitre sur l'épaisseur de copeau [page 21]
Perte de profil	Meule trop "tendre"	Utiliser une meule de grade plus "dur"	**Risque:** dommages thermiques, facettes
		Utiliser un abrasif plus fin	Des grains plus fins rendent la meule plus "dure", réduisant ainsi l'usure de la meule.
		Utiliser un abrasif plus résistant	**Risque:** dommages thermiques causés par un auto-affûtage médiocre des grains non-friables.
		Diminuer l'épaisseur du copeau	**Risque:** une épaisseur de copeau plus faible entrave l'auto-affûtage de la meule, notamment avec des abrasifs non-friables et céramiques SG [page 21].
	Grains trop gros pour réaliser le rayon de courbure	Utiliser un abrasif plus fin et une meule plus "dure"	Des grains plus fins permettent de réaliser un rayon de courbure plus petit. **Risque:** dommages thermiques.

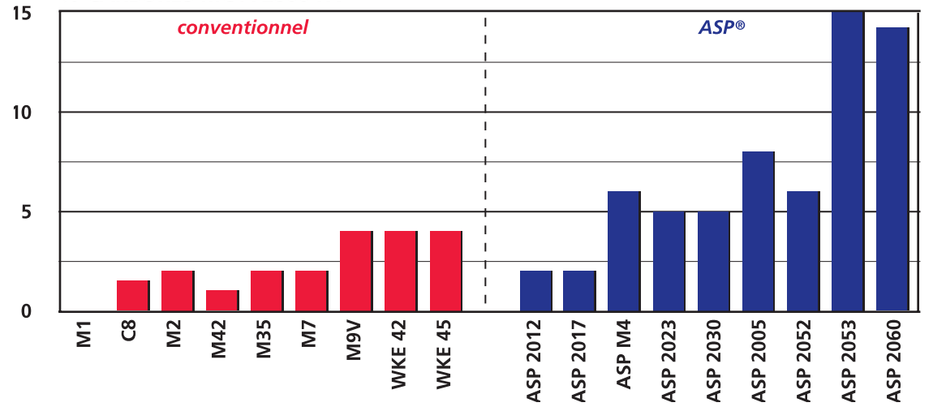


La rectification de l'acier ASP® est semblable à la navigation dans un océan de glaçons – comparée à la navigation dans un océan d'icebergs.

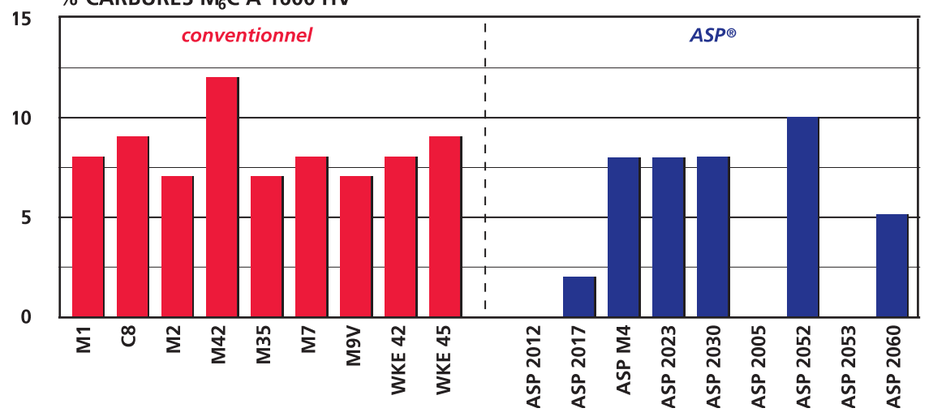
MEULABILITÉ DES NUANCES ERASTEEL



% CARBURES MC À 2800 HV



% CARBURES M_6C À 1600 HV



Classement de la meulabilité, pour la rectification avec des abrasifs conventionnels ; basé sur des essais de rendements (G ratio) et l'expérience pratique. Lors de la rectification avec des superabrasifs, les différences entre les nuances seront en général moins prononcées.

ERASTEEL

Grinding of High-Speed Steels_FR_2007