



**HAL**  
open science

## Choix et usinage des carbures de tungstène

Jacques Calzas

► **To cite this version:**

Jacques Calzas. Choix et usinage des carbures de tungstène. Mottin, Stéphane and Lelièvre, Gérard. Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions, 18, MRCT-CNRS, pp.107-117, 2011, Intégrations des savoirs et des savoir-faire, 978-2-918701-04-0. 10.5281/zenodo.400487 . hal-01472119

**HAL Id: hal-01472119**

**<https://hal.science/hal-01472119>**

Submitted on 30 Mar 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Cliquer sur le sommaire pour parcourir plus vite ce document.

<b><u>Choix et usinage des carbures de tungstène</u></b> .....	<b>107</b>
<u>1 – Choix des carbures de tungstène</u> .....	107
<u>2 – Usinage du carbure de tungstène</u> .....	109
<u>2 – 1. Conception des pièces</u> .....	109
<u>2 – 2. Usinage par rectification</u> .....	110
<u>2 – 3. Usinage par électroérosion</u> .....	111
<u>2 – 4. Comparaison entre rectification et électroérosion</u> .....	116
<u>2 – 5. Polissage manuel</u> .....	116
<u>3 – Remerciements</u> .....	117

Liens : <https://doi.org/10.5281/zenodo.400487>  
<http://www.sudoc.fr/155436619>  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01472119>  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/INTEGRATIONS/page/materiaux-et-joints-etancheite-pour-les-hautes-pressions>  
<https://zenodo.org/communities/integrations>

### Référence au format BibTeX :

```
@inbook{9materiaux18_2011,
location = {Meudon},
edition = {{3e éd.}},
title = {Choix et usinage des carbures de tungstène},
isbn = {978-2-918701-04-0},
url = {http://www.sudoc.fr/155436619},
series = {Intégrations [des savoirs et des savoir-faire]},
abstract = {Préface / Dominique Lequillon P. 17. Introduction générale / Patrick Boissinot, Patrick Langlois, Agílio A.H. Pádua P. 21. Introduction au dimensionnement / Agílio A.H. Pádua 1 — Définition du problème 2 — Dimensionnement 3 — Obturateurs 4 — Conclusion P. 31. Fretage et autofretage / Patrick Langlois 1 — Considérations préliminaires au fretage 2 — Fretage d'une enceinte bloc 3 — Fretage d'une enceinte multibloc 4 — Formulation de l'autofretage 5 — Modes de réalisation de l'autofretage 6 — Conclusion P. 55. Méthodes d'éléments finis en calcul de structures élastiques / Joël Frelat 1 — Introduction 2 — Rappel de la formule théorique 3 — Formulation variationnelle 4 — Formulation numérique 5 — Etapes d'une mise en œuvre pratique 6 — Conclusion — Extension aux problèmes non linéaires P. 65. Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions / Jean-Paul Dichtel 1 — Caractérisation mécanique des aciers 2 — Métallurgie des aciers et superalliages 3 — Commentaires : la Directive Européenne Appareils à Pression P. 77. Les métaux non ferreux – Alliage cuivre-béryllium et titane / Jean-Pierre Petitot 1 — Introduction 2 — Le cuivre-béryllium 3 — Le titane P. 85. Les Carbures cémentés (WC)-Co / Emmanuel Pauty 1 — Les procédés de fabrication 2 — Les propriétés des carbures cémentés 3 — Conclusions P. 99. Choix et usinage des carbures de tungstène / Jacques Calzas 1 — Choix des carbures de tungstène 2 — Usinage du carbure de tungstène P. 111. Céramiques et matériaux pour l'optique / Jean-Claude Chervin 1 — Céramiques 2 — Matériaux pour l'optique P. 141. Types de joints et de montage / Roger Argoud et Jacques Roux 1 — Introduction 2 — Généralités 3 — Joints à basse pression 4 — Joints cône sur cône 5 — Joints Bridgman Champignon 6 — Joints annulaires auto-serrés 7 — Joints coniques d'Amagat 8 — Autres joints 9 — Conclusion P. 161. Joints hautes pressions pour la compression de gros volumes solides / Sylvie Le Floch 1 — Joints solides utilisés dans les différents types d'enceintes hautes pressions 2 — Matières premières des joints 3 — Assemblages (HP)-(HT) P. 173. Le matériel standard / Jean-Pierre Petitot 1 — Tubes, conduites et raccords 2 — Les vannes 3 — Quelques types d'enceintes commercialisées 4 — Les générateurs de pression 5 — Le matériel moins standard P. 187. Assemblages haute pression / Gérard Hamel 1 — Montage des raccords de pressions 2 — Montage de quelques passages électriques 3 — Les passages de thermocouple 4 — Les passages optiques, montage des fenêtres 5 — Montage des joints et des obturateurs sur une cellule haute pression P. 197. Usinage / Jean-Pierre Michel 1 — Introduction 2 — Les joints de faible épaisseur 3 — Les bagues anti-extrusion à 45° 4 — Les joints à 45° 5 — Les joints « double Bridgman » 6 — Les joints plats en élastomères 7 — Les joints en indium (étanchéité en hélium et azote liquide 8 — Joints métal-métal type Lens ring 9 — Les passages du courant 10 — Usinage de matériaux exotiques P. 211. Les règles de sécurité / Patrick Boissinot 1 — Dangers présentés par les appareils à pression 2 — Appareils à pression rencontrés dans les laboratoires et facteurs de risques 3 — Principes généraux de prévention et réglementation 4 — Moyens de protection 5 — Conclusion},
pages = {95–107},
number = {18},
booktitle = {Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions},
publisher = {{MRCT}-{CNRS}},
author = {Calzas, Jacques},
bookauthor = {Boissinot, Patrick and Langlois, Patrick and Pádua, Agílio},
editor = {Mottin, Stéphane and Lelièvre, Gérard},
editorb = {Mottin, Stéphane},
editorbtype = {redactor},
date = {2011},
langid = {french},
keywords = {Hautes pressions -- Matériaux, Joints d'étanchéité, Matériaux -- Effets des hautes pressions} , doi = {10.5281/zenodo.400487},
}
```

# Choix et usinage des carbures de tungstène

*Jacques Calzas*

SUCTAS S.A. (Société d'Usinage du Carbure de Tungstène et des Aciers Spéciaux)  
74 sente Fontaine aux Bouchers – 93110 Rosny-sous-bois

## 1 – Choix des carbures de tungstène

Comme indiqué dans le chapitre précédent, les caractéristiques mécaniques des carbures de tungstène varient principalement en fonction de la teneur en liant (cobalt ou nickel) et de la taille des grains. Rappelons que :

- lorsque la teneur en liant augmente, la dureté et la résistance à la compression diminuent tandis que la résistance à la flexion augmente (jusque vers 20% m Co),
- à teneur en liant inchangée, lorsque la taille des grains augmente, la résistance à la compression diminue,
- il faut rester prudent dans les nuances de carbure à grains très fins ; c'est pourquoi nous n'y limiterons pas nécessairement notre choix.

Les tableaux 1 et 2 indiquent pour deux fabricants de carbures de tungstène les caractéristiques principales à température ambiante de quelques nuances d'intérêt potentiel pour les hautes pressions.

Dans le cas de montages utilisant le système poinçon – matrice où poinçon et noyau de matrice sont en carbure de tungstène, il peut être judicieux de choisir une nuance de carbure privilégiant la résistance à la flexion pour le poinçon mais une nuance pour le noyau présentant une plus grande résistance à la compression. En effet, la frette de la matrice qui exerce une compression radiale sur le noyau en carbure de tungstène limite la déformation de celui-ci lorsque la matrice est sollicitée. L'effet de la frette compense alors la moindre élasticité de cette nuance de carbure de tungstène.

**Résistance à la corrosion.** La corrosion du carbure de tungstène s'exprime généralement par une attaque du liant à partir de la surface. Un carbure à teneur en cobalt faible résistera donc un peu mieux. Mais en milieu acide, la résistance maximale à la corrosion est obtenue par un carbure de tungstène à liant nickel.

Toutefois, du fait de la grande variété des facteurs influant sur la corrosivité du milieu (pH, température, conductivité électrique, etc.), il est conseillé de procéder à des essais.

**Amélioration superficielle de la dureté et du coefficient de frottement.** Le dépôt d'une ou plusieurs couches (quelques 1/1000 mm) sur la surface polie (rugosité inférieure à  $R_a$  0,4  $\mu$ m, recommandée  $R_a$  0,1 à 0,2  $\mu$ m) et non oxydée permet d'augmenter la dureté superficielle et de diminuer le coefficient de frottement comme l'indique le tableau 3. Le revêtement de Nitrure de Titane Aluminium permet également d'améliorer la résistance à l'oxydation.

Tableau 1 – Caractéristiques de nuances de carbures. D'après document CARBEX.

Nuance	Teneur en Co (% m)	Taille des grains*	Dureté HV (+/- 50)	R <sub>m</sub> compression (kN/mm <sup>2</sup> )	R <sub>m</sub> flexion (kN/mm <sup>2</sup> )
CHX04	4	micro	1750	6.9	1.8
CH01	5.5	fin	1650	6.7	1.95
CH1	6	fin	1600	6.5	2
G1	6	moyen	1520	6	2.2
MG10	10	micro	1600	7	3
G2	10	fin à moyen	1430	5.6	2.5
G3	15	fin à moyen	1160	5.3	2.7
G35	15	gros	1050	5	2.9
G45	20	gros	1000	4.7	2.85
G6	25	gros	800	4.5	2.7

(\*) Suivant appellation : "micro" : < 1 µm, "fin" : 1 – 2 µm, "moyen" : 2 – 3 µm, "gros" : > 3 µm.

Tableau 2 – Caractéristiques de nuances de carbures. D'après document SANDVIK.

Nuance	Teneur en Co (% m)	Taille des grains* (µm)	Dureté HV	R <sub>m</sub> compression (kN/mm <sup>2</sup> )	R <sub>m</sub> flexion (kN/mm <sup>2</sup> )
3UF	3	0.4	> 2250	11.5	2.5
H3F	3	0.8	1925	7.8	3.3
6UF	6	0.4	2050	9	2.85
H6F	6	0.8	1775	6.9	3.5
8UF	8	0.4	1900	7.7	3.15
H12N	12	1.7	1300	4.6	2.8
H15N	15	1.7	1150	4	3.05
H20P	20	2.8	910	3.6	2.9
H25P	25	2.8	810	3.3	2.75

(\*) Suivant lettre en fin de nuance : F: 0.4 – 0.8 µm, M: 1.2 µm, N: 1.7 µm, P: 2.8 µm, C: 4.3 µm, T: > 5 µm.

Tableau 3 – Valeurs de dureté et de coefficient indicatif de frottement pour divers dépôts.  
D'après document BODYCOTE HIT.

Nature du dépôt	Dureté HV	Coefficient de frottement*
Nitride de Titane	2300 à 2500	0.3 à 0.4
Carbonitride de Titane	3000 à 3400	0.3 à 0.4
Nitride de Titane Aluminium	2000 à 2700	0.4 à 0.5
Nitride de chrome	2000 à 2400	0.5
Carbone Diamant amorphe	3500 à 5500	0.1

(\*) Déterminé à partir d'un acier 100C6 sur une surface polie de rugosité R<sub>a</sub> 0,1 µm où, sans revêtement, le coefficient de frottement serait d'environ 0.80.

Il est à noter que ces dépôts peuvent être difficiles à réaliser dans le cas d'alésages, surtout pour des diamètres inférieurs à 10 mm ou pour des rapports diamètre/profondeur inférieurs à 2.

## 2 – Usinage du carbure de tungstène

Comme cela a été montré pour la fabrication de pièces en carbure de tungstène, la compression du mélange granulé (poudre de carbure de tungstène et de cobalt liée par un liant organique) suivie du frittage de la pièce s'accompagnent d'une variation géométrique et dimensionnelle non négligeable. La précision de l'ébauche finie réalisée est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre, voire le millimètre pour des dimensions d'ébauche massive de 150 mm. Pour assurer une grande précision géométrique et dimensionnelle (1/100 mm), il faut donc usiner une ébauche présentant des surépaisseurs suffisantes.

Du fait de la très grande dureté du carbure de tungstène qui peut atteindre 2000 Vickers, les seuls procédés d'usinage possibles sont soit la rectification avec des meules diamantées, soit l'électroérosion suivie éventuellement d'une opération de finition par polissage ou rodage.

### 2 – 1. Conception des pièces

Les pièces conçues en carbure de tungstène doivent tenir compte des propriétés du carbure de tungstène (résistance importante à la compression mais faibles résistances à la flexion et au choc parallèlement) ainsi que des possibilités d'usinage du carbure de tungstène (enlèvement de matière lent et onéreux). Il faudra notamment prendre soin de :

- raccorder autant que faire se peut les sections différentes par des rayons afin d'éviter les concentrations de contraintes sous l'effort,
- ne pas prévoir de taraudages (sources de fissuration et très difficiles à faire en électroérosion) pour les fixations mais penser à la place à des inserts rapportés dont le matériau devra être choisi en fonction des conditions d'utilisation afin que leur assemblage reste compatible avec le carbure (par exemple, problème des dilatations respectives sous température),
- éviter les arêtes vives en extrémités de pièce, sources d'écaillage ou de départ de fissures sous contraintes, mais privilégier les chanfreins ou les arrondis,
- éviter les sections trop faibles ou les épaisseurs trop fines en veillant à dimensionner les pièces selon les caractéristiques mécaniques de leur matériau et leurs conditions d'utilisation (pression, température, milieu),
- ne demander des précisions de l'ordre du 1/100 mm que pour les parties fonctionnelles justifiées (le coût augmentant avec la précision),
- ne demander des états de surfaces poussés que là où ils sont nécessaires (le coût augmentant aussi avec l'état de surface).

## 2 – 2. Usinage par rectification

**Principe.** Une meule en rotation enlève des micro-copeaux sur la surface de la pièce en contact. Cette meule est constituée de grains de diamant qui sont soit maintenus dans un liant métallique ou résinoïde (épaisseur de couche de plusieurs millimètres), soit déposés par électrolyse sur un support métallique (couche de quelques dixièmes de millimètre). Afin de limiter l'échauffement de la pièce et de la meule, ainsi que pour faciliter l'évacuation de la matière rectifiée, cette opération doit se réaliser sous arrosage.

Le temps d'enlèvement de matière étant long et proportionnel au volume de carbure rectifié, il est souvent globalement plus économique de rectifier une ébauche dont la forme approche celle de la pièce finie aux surépaisseurs de rectification près. Par exemple, une matrice sera ébauchée brute de frittage avec son alésage, son cône et son rayon d'entrée.

**Surfaces réalisables.** Une surface ne peut être usinée par rectification que si elle relève de l'une des quatre catégories suivantes :

**Surfaces planes :** usinables soit par rectification avec une meule cylindrique, la pièce étant fixée sur une table qui se déplace sous la meule en rotation, soit par rectification avec une meule boisseau, la pièce étant fixée sur un mandrin tournant face à la meule elle-même en rotation.

**Surfaces cylindriques ou coniques :** intérieures ou extérieures mais, en rectification intérieure, le diamètre minimum de l'alésage rectifié dépendra du diamètre de la meule montée sur tige (pour limiter la flexion de la tige, ce diamètre minimum est d'environ 5 mm).

**Surfaces pseudo-toriques :** réalisables à l'aide de rectifieuses numériques permettant un déplacement curviligne de l'axe de rotation de la meule face à une pièce en rotation. De telles surfaces seront toutefois avantageusement usinées par électroérosion par enfonçage.

**Profils rectilignes :** réalisables par combinaison de la rotation d'une meule de profil et d'un déplacement rectiligne de la pièce, ils ne sont envisageables que pour une légère rectification de pièces de série. Une rectification plus grande entraînerait une usure trop importante de la meule qu'il n'est pas possible de retailer. De tels profils seront, cette fois, avantageusement usinés par électroérosion à fil.

**Catégories d'outils.** La grosseur des grains de diamant influe sur la rugosité de la surface rectifiée et le débit d'enlèvement de carbure tandis que la concentration du diamant dans le liant et la résistance de ce liant influent sur le débit d'enlèvement de carbure et l'usure de la meule. La rectification débutera donc, selon la quantité de matière à rectifier, avec une meule d'ébauche ou intermédiaire et se poursuivra, selon l'état de surface voulu, avec une meule intermédiaire ou de finition.

Les meules d'ébauche ont des grains de diamant 252 à 127 avec soit un liant métallique pour limiter l'usure de la meule au détriment de la vitesse d'enlèvement de la matière, soit un liant résinoïde pour obtenir l'effet opposé. Les meules intermédiaires ont des grains de 127 à 76 avec soit un liant métallique lorsqu'elles sont susceptibles de servir de meule d'ébauche pour de petites rectifications, soit un liant résinoïde lorsqu'elles ne sont utilisées qu'après ébauche. Enfin, les meules de finition ont des grains de 46 à 16 avec un liant résinoïde.

**États de surface.** Nous rappellerons tout d'abord que les écarts géométriques entre une surface théorique parfaite et la surface effectivement réalisée sont classés en 4 ordres :

- 1<sup>er</sup> ordre : écart de forme,
- 2<sup>ème</sup> ordre : ondulation,
- 3<sup>ème</sup> ordre : rugosité due aux stries et sillons,
- 4<sup>ème</sup> ordre : rugosité due aux arrachements ou autres défauts de surface,

tandis que la rugosité est essentiellement caractérisée par deux valeurs,  $R_{max}$  et  $R_a$ , qui représentent respectivement la profondeur totale de rugosité et la rugosité moyenne arithmétique, les valeurs nominales normalisées (norme NF E 05-051) de cette dernière variant autour de  $6,3 \mu\text{m}$  par progression géométrique de raison 2 de  $0,0125$  à  $3,2 \mu\text{m}$  puis de  $12,5$  à  $400 \mu\text{m}$ .

Les éventuelles flexions et vibrations que l'on risque de rencontrer en cours de rectification peuvent engendrer des écarts géométriques du 1<sup>er</sup> ordre et du 2<sup>ème</sup> ordre tandis que la rugosité atteinte peut varier entre  $R_a 3,2 \mu\text{m}$  typiquement et jusqu'à  $R_a 0,05 \mu\text{m}$  en finition, selon les meules employées et les conditions ainsi que la durée de la rectification.

**Coût.** Il est intéressant de noter, pour mieux saisir la recommandation de ne formuler que des demandes nécessaires et suffisantes, que le coût global de rectification d'une pièce résulte de l'ensemble des coûts suivants :

- ébauche demandée à une forme approchant la pièce finie,
- usure de la meule, voire changements de meules,
- montages d'usinage éventuels (par exemple, maintien de la pièce sur rectifieuse),
- temps de montage et de réglages,
- temps et taux horaire d'usinage proprement dit, avec présence ou non de l'opérateur,
- temps et taux horaire du polissage ou du rodage ultérieurs éventuels (selon l'état demandé et les meules utilisées),
- contrôles géométrique, dimensionnel et d'état de surface.

## 2 – 3. Usinage par électroérosion

**Principe.** Un générateur électrique crée une différence de potentiel entre la pièce et une électrode toutes les deux électriquement conductrices mais séparées par un liquide isolant. Lorsque électrode et pièce se rapprochent, un arc électrique se forme entre celles-ci et provoque l'enlèvement de matière, ce qui produit un micro-cratère de chaque côté de l'arc.

La Figure 1 décrit plus finement ces diverses étapes : il faut tout d'abord que la distance électrode / pièce soit suffisamment faible pour que des électrons quittent la cathode sous l'action du champ électrique appliqué (cf. Figure 1a). Une ionisation par chocs se produit alors et engendre l'initiation d'un canal ionisé (cf. Figure 1b). Le bombardement ionique débute vraiment dès que le canal atteint la paroi opposée (cf. Figure 1c). La température et la pression augmentent alors considérablement dans le canal ionisé. Le canal ionisé atteint son maximum et, en surface au niveau du canal, le métal se vaporise (cf. Figure 1d). C'est aussi le moment que l'on choisit pour couper la tension. La tension puis l'intensité redeviennent nulles et les ions sont évacués par la circulation du fluide diélectrique (cf. Figure 1e).



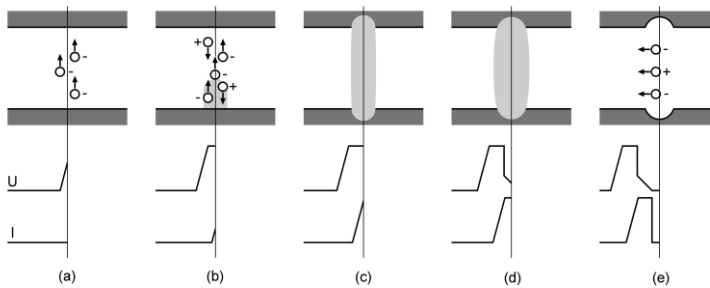


Figure 1 – Étapes chronologiques de création de l'arc électrique et des micro-cratères et variations concomitantes de la tension  $U$  et de l'intensité électrique  $I$ .

La tension n'est en fait coupée qu'un bref instant (temps de repos) puis rétablie pendant un autre bref instant (temps actif) de sorte qu'un nouvel arc se produise et que le cycle se poursuive. A aucun moment il ne doit y avoir contact entre électrode et pièce. Si ce cas tendait à se produire, l'asservissement écarterait immédiatement les deux surfaces. Par ailleurs, si l'érosion électrique a bien pour conséquence un enlèvement de carbure côté pièce, ce qui est le but recherché, elle entraîne également une usure de l'électrode dépendant des régimes d'usinage et de la nature du matériau la constituant.

Superficiellement, la surface érodée est altérée. On y trouve les cratères d'érosion dûs aux arcs électriques ainsi qu'une couche thermiquement perturbée due à l'élévation très importante de température localisée à l'extrémité de l'arc. La profondeur de cette couche, dite « blanche », dépend des paramètres d'usinage tels que :

- intensité des décharges électriques,
- durée des décharges et des temps de repos entre 2 décharges,
- mode de la décharge (intensité constante ou progressive).

L'électroérosion consistera donc en :

- un premier usinage avec régime d'ébauche pour enlever le plus rapidement de la matière, au détriment de l'état de surface et de la profondeur de la couche perturbée, dépendant de la quantité de matière à éroder (volume d'enlèvement de matière en enfonçage, hauteur de la découpe en découpe à fil),
- plusieurs autres usinages avec régimes de demi-finition et finition pour diminuer l'épaisseur de la « couche blanche » et améliorer l'état de surface. En découpe à fil, ces étapes sont appelées « repassages ».

**Catégories de machines.** On distingue les électroérosions par enfonçage où l'électrode massive est usinée à la forme à réaliser (compte-tenu de l'écart constitué par la longueur des arcs électriques) et les électroérosions à fil où l'électrode est un fil, la surface réglée étant engendrée par le déplacement relatif entre la pièce et ce fil, suivant un mouvement piloté par commande numérique. Ce procédé est souvent appelé « découpe à fil » tout en sachant que ce n'est pas le fil qui découpe la pièce.

**Electroérosion par enfonçage.** L'électrode est en cuivre ou en cupro-tungstène et est réalisée par tournage ou par fraisage voire, dans le cas de formes complexes, par électroérosion à fil.

Elle est fixée sur la tête de la machine afin de plonger vers la pièce fixée dans le bac de travail et immergée dans le fluide diélectrique (hydrocarbure spécial, filtré et à température stabilisée). L'électrode d'enfonçage se déforme géométriquement et dimensionnellement (voir Figure 2). Il faut donc la retoucher ou la remplacer un certain nombre de fois, sachant que l'empreinte réalisée dans la pièce dépend de la forme de l'électrode et du gap d'électroérosion qui dépend lui-même du régime d'usinage.

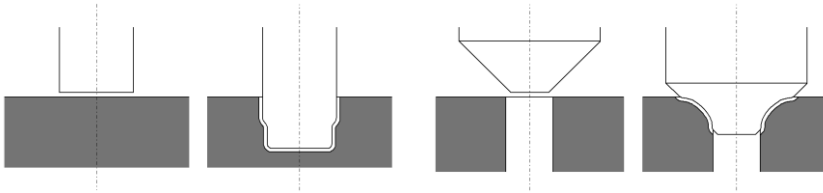


Figure 2 – Types d'usure des électrodes d'enfonçage et altérations résultantes de l'empreinte réalisée.

Pour des formes composées de parties verticales et coniques associées, l'usinage se fait en utilisant d'abord une électrode conique puis une droite (voir Figure 3). Par ailleurs, à l'instar de la rectification, le temps d'enlèvement de matière étant long et proportionnel au volume de carbure érodé, il est souvent globalement plus économique d'éroder une ébauche dont la forme approche celle de la pièce finie aux surépaisseurs d'érosion près. Par exemple, trous, alésages, chanfreins et rayons seront avantageusement ébauchés brut de frittage.

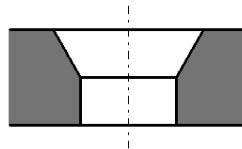


Figure 3 – Forme composée de parties conique et droite.

**Electroérosion à fil.** L'électrode est un fil de laiton de diamètre le plus fréquent 0,25 mm qui, en phase d'usinage, se déroule en continu d'une bobine. Le fil est guidé verticalement par deux bras, le déplacement relatif d'un bras par rapport à l'autre étant commandé numériquement pour contrôler une possible inclinaison variable de ce fil. La pièce est fixée dans un bac de travail également commandé numériquement sur ses deux axes et immergée dans le fluide diélectrique (eau désionisée, filtrée et à température stabilisée). Les déplacements relatifs entre la pièce et le fil permettent d'engendrer tout profil de surfaces réglées. On peut donc obtenir des surfaces coniques de section horizontale de forme, deux sections pouvant être de forme différente (par exemple un carré et un cercle). Comme précédemment, pour des formes composées de parties verticales et coniques associées, l'usinage se fait en réalisant une découpe conique puis une verticale (voir Figure 3). Enfin, le temps de découpe étant proportionnel à la longueur découpée, l'ébauche peut n'être que le volume enveloppe de la pièce finie de manière à simplifier la forme de cette ébauche. Par exemple, une enclume peut directement être découpée à partir d'un bloc parallélépipédique.

**Comparaison entre électroérosion par enfonçage et électroérosion à fil.** Nous faisons porter notre comparaison sur les divers cas qui peuvent se présenter, tant du point de vue des

formes à réaliser que de toute autre circonstance, telle que l'usure prévisible d'une électrode, et qui sont de nature à favoriser, limiter voire exclure l'emploi de l'une de ces techniques.

**Conditions qui favorisent l'électroérosion à fil par rapport à celle par enfonçage :**

- Usure de l'électrode : comme nous l'avons mentionné précédemment, l'arc électrique enlève également de la matière du côté de l'électrode. En électroérosion à fil, c'est le déroulement continu du fil qui lui permet de ne pas rompre et de conserver son diamètre de calibrage. Il n'y a donc pas lieu de tenir compte de l'usure de l'électrode (si ce n'est que dans la vitesse de défilement du fil). Au contraire, en enfonçage, l'usure de l'électrode modifie la forme de l'électrode et donc la forme réalisée. Il y a lieu de retoucher ou de changer régulièrement l'électrode avant que cette altération ne devienne trop importante.
- Complexité de la forme à réaliser : avec le fil, c'est la commande numérique qui réalise le profil alors qu'en enfonçage il faut usiner une électrode de forme appropriée. Il vaut donc mieux réserver l'enfonçage pour les formes simples.
- Formes en deux parties (voir Figure 3) : elles peuvent être réalisées en électroérosion à fil à partir du même programme en deux découpes successives, alors qu'il faut deux électrodes différentes en électroérosion par enfonçage.

**Conditions qui limitent l'emploi de la découpe à fil :**

- En découpe intérieure, il faut préalablement avoir un trou débouchant permettant l'enfilage du fil. Ce trou peut être percé sur l'ébauche avant frittage (opération réalisée avec un foret diamanté) ou réalisé par électroérosion par enfonçage à l'aide d'une électrode tubulaire (le diamètre de perçage étant limité par celui du tube-électrode),
- Existence d'un angle limite dans le cas de surfaces en pente, l'inclinaison du fil étant limitée par les courses du guide-fil et la hauteur de la pièce (15° pour 60 mm de hauteur, 25° pour une pièce de 30 mm). En outre, si une forme composée implique une découpe conique, il faudra s'assurer que le passage du fil ne vienne pas interférer avec d'autres parties de la pièce, comme illustré Figure 4 où le fil incliné toucherait la partie cylindrique.

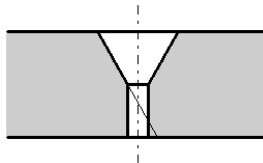


Figure 4 – Forme composée où une découpe conique à fil est devenue irréalisable.

- La largeur découpée minimale ainsi que les rayons minimaux de raccordement (voir Figure 5) sont limités par le diamètre  $2R$  du fil. Le diamètre couramment utilisé est de 0,25 mm,  $\varnothing$  0,30 étant pour les pièces les plus épaisses (50 à 80 mm) et  $\varnothing$  0,20 pour des découpes intérieures où l'on tient à diminuer la valeur des rayons de raccordement.

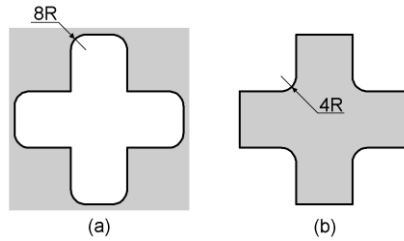


Figure 5 – Rayons minimaux de raccordement pour une pièce femelle (a) et une pièce mâle (b).

### Conditions qui excluent l'électroérosion à fil au profit de celle par enfonçage :

- formes avec épaulement (voir Figure 6a),
- formes intérieures borgnes, le fil devant traverser la pièce (voir Figure 6b),
- formes sphériques et toriques et, plus généralement, toute surface non réglée (c'est à dire non engendrée par une droite).

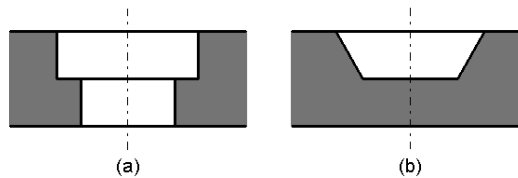


Figure 6 – Forme avec épaulement (a) et forme borgne (b) réservées à l'électroérosion par enfonçage.

**États de surface.** La profondeur totale de rugosité  $R_{max}$  dépend du régime d'usinage. En enfonçage avec régime d'ébauche, elle peut atteindre 200 à 300  $\mu m$ , pour descendre jusque vers 10  $\mu m$  en régime de finition. Quant à la rugosité, les régimes de finition employés (surtout pour les formes femelles grâce à la simplicité de leur mise en œuvre) permettent d'abaisser la rugosité jusque vers  $R_a$  1,60  $\mu m$ . Pour des rugosités inférieures, il est nécessaire de procéder à une opération ultérieure de polissage

**Coût.** Le coût global d'une pièce réalisée par électroérosion résulte de l'ensemble des coûts suivants :

- ébauche (demandée à une forme approchant la pièce finie en cas d'électroérosion par enfonçage),
- programmation (dans le cas d'électroérosion à fil),
- usinage et retouches de la (ou des) électrode(s) dans le cas d'électroérosion par enfonçage,
- montages d'usinage éventuels,
- temps de montage et de réglages,
- temps et taux horaire d'usinage proprement dit, avec présence ou non de l'opérateur,
- temps et taux horaire du polissage voire du rodage souvent nécessaires ultérieurement,
- contrôles géométrique, dimensionnel et d'état de surface.

## 2 – 4. Comparaison entre rectification et électroérosion

**Effort mécanique sur la pièce.** En rectification, c'est, de par le procédé même, le contact entre la meule et la pièce qui engendre un effort mécanique même quand la prise de profondeur de passe est faible (1/1000 mm). Le maintien de la pièce par magnétisme direct n'est pas suffisant ; un serrage sur mandrin ou étau est nécessaire.

En électroérosion, le procédé ne crée pas d'effort mécanique. Un bridage modéré de la pièce est suffisant pour la maintenir.

**Couche superficielle altérée.** En rectification, il ne se produit pas d'altération de la couche superficielle à condition de limiter la vitesse de descente de la meule dans la pièce et de soigner l'arrosage.

En électroérosion, la « couche blanche » est d'épaisseur d'autant plus faible que le nombre de « repassages » est grand, mais elle subsiste cependant. Cette couche peut être source de micro-fissures dans le cas de contraintes importantes.

**États de surface.** En rectification, l'état de surface obtenu dépend de la profondeur des rayures engendrées par les grains de diamant (qui dépendent elles-mêmes de la finesse des grains, leur profondeur pouvant être quasiment nulle avec une meule de finition) augmenté de l'erreur géométrique liée aux flexions et vibrations de la meule et de la rectifieuse, d'où la nécessité de plusieurs meules (ébauche, demi-finition et finition).

En électroérosion, une découpe suivie de plusieurs « repassages » améliore déjà l'état de surface (de  $R_a$  4,5 à 1,6  $\mu\text{m}$  environ). Pour un état de surface encore meilleur, il devient nécessaire de polir la surface érodée.

## 2 – 5. Polissage manuel

Bien que la rectification permette d'obtenir un état de surface très fin par l'emploi approprié d'une meule de finition, il n'est pas exclus d'opérer un polissage manuel après rectification afin d'atténuer les défauts d'état de surface :

- avec un grain plus fin que ceux de la meule pour améliorer l'état de surface,
- avec un grain équivalent à ceux de la meule pour atténuer les défauts éventuels d'ondulation.

En ce qui concerne l'usinage par électroérosion, un état de surface inférieur à  $R_a$  1,6  $\mu\text{m}$  et, à fortiori, un état « poli miroir » nécessitent le polissage. D'autre part, comme nous l'avons vu précédemment, le recours à l'électroérosion entraîne au niveau de la surface érodée une couche perturbée. Bien que de faible épaisseur après les régimes de finition, cette couche peut être enlevée par polissage.

Dans tous les cas, cette opération qui vise à améliorer l'état de surface entraîne une modification des dimensions de la pièce (de quelques 1/1000 mm à 2/100 mm environ) dont il y a éventuellement lieu de tenir compte.

**Principe.** Le polissage consiste, à l'instar de la rectification, à enlever de la matière avec des grains de diamant, grains d'autant plus fins que l'état de surface à obtenir sera poussé. C'est donc paradoxalement en rayant la surface que l'état « poli miroir » peut être réalisé, mais en le rayant de plus en plus finement de manière à améliorer l'état de surface.

Le polissage se fait grâce au frottement d'un rodoir tenu à la main alors que la pièce tourne (dans le cas de surfaces de révolution) ou reste immobile (dans les autres cas). La grosseur des grains utilisés au départ du polissage sera choisie de manière à ne pas altérer l'état de surface obtenu en sortie de rectification ou d'électroérosion, puis des grains de plus en plus fins seront ensuite utilisés jusqu'à obtenir l'état de surface souhaité. La rugosité peut ainsi atteindre le niveau de  $R_a$  0,1  $\mu\text{m}$  environ.

**Coût.** Le coût est directement lié au temps de polissage qui dépend lui-même des points suivants :

- état de surface initial,
- dimension de la surface à polir,
- complexité de cette surface,
- état de surface à obtenir et/ou ajustement désiré entre deux pièces.

### 3 – Remerciements

L'auteur remercie N. Girodon-Boulandet pour les illustrations.