

USINAGE PHOTOCHEMIQUE

(PCM - PhotoChemical Machining)



CMT Rickenbach SA,
Bd. de la Liberté 59-61,
CH-2300 La Chaux-de-Fonds,
Tél. +41 (0)32 910 03 03
www.cmtrickenbach.com

Julien Duvillet
Responsable Méthodes & Développement
j.duvillet@cmtrickenbach.com



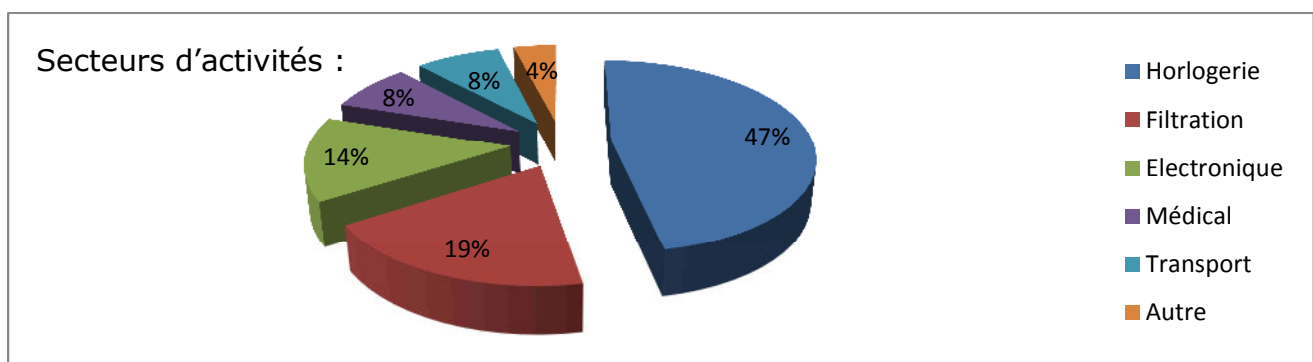
CMT Rickenbach a été créé et est actif dans le domaine de l'usinage photochimique depuis 1982. L'entreprise se situe à la Chaux de Fonds, en Suisse, et comporte une soixantaine de collaborateurs. L'activité peut être scindée en deux parties :

→ Décorations de mouvements horlogers

- Gravure mécanique, chimique et laser
- Traitement de surface
- Décoration mécanique
- Galvanotechnique

→ Réalisation de pièces techniques et décoratives

- Usinage photochimique
- Technologies laser : Découpe, soudage, gravure et marquage
- Micropliage
- Galvanotechnique



L'usinage photochimique, souvent méconnu, est un procédé de fabrication assez ancien. Il est utilisé de manière industrielle depuis les années 50, ce qui coïncide avec le début du développement de la photolithographie dans l'industrie du circuit imprimé. L'usinage de matière par attaque chimique en voie humide existe depuis plusieurs siècles. On peut citer la gravure à « l'eau-forte » sur plaque de cuivre employée dès le Moyen Âge par les orfèvres arabes ou bien encore l'utilisation d'un acide à base de vinaigre associé à une huile de graine de lin comme masquage pour la gravure décorative d'armure en acier au XV siècle. Avec l'avènement de la photographie au XIX siècle, les premières résines photosensibles ont fait leur apparition. On retrouve un premier brevet datant de 1852 décrivant le procédé d'usinage photochimique pour la gravure de cuivre à l'aide de perchlorure de fer. Depuis, les formulations de photorésist et les techniques de photolithographie ont beaucoup évolué. Ces siècles d'innovation ont permis à l'usinage photochimique d'atteindre le niveau de performance décrit dans cette présentation.

Les deux éléments principaux du procédé d'usinage photochimique sont les solutions d'attaques chimiques et les résines photosensibles (ou photorésist). De manière simplifiée, cette méthode de fabrication peut être décomposée en quatre phases :

- La préparation de surface qui consiste à optimiser la surface du matériel afin d'obtenir la meilleure adhérence avec le photorésist.
- L'opération de photolithographie.
- La phase de gravure chimique.
- Le strippage qui consiste à retirer le photorésist et assurer le nettoyage final des pièces.

On retrouve, principalement dans l'industrie, deux méthodes de travail : la plus répandue est la méthode de travail en plaque et la seconde, plutôt adaptée aux très gros volumes, la méthode « reel to reel » (de rouleau à rouleau).



Exemple d'installation « reel to reel » d'usinage photochimique.

L'usinage photochimique permet la fabrication de pièces dans quasiment tous les métaux mais également dans certains matériaux comme par exemple le verre ou le polyimide. Mais ce sont les aciers inoxydables, les métaux ferreux et les métaux cuivreux qui représentent la majorité des productions en usinage photochimique. On utilise, principalement dans l'industrie, des panneaux de quelques microns à 2mm d'épaisseur. Appliquée à des matériaux de faibles épaisseurs (inférieures à 0.1mm) et combinée à la précision de la photolithographie, cette méthode assure la production de pièces avec des formes géométriques très complexes et aux tolérances serrées. Généralement, les tolérances données pour des pièces en usinage photochimique sont de +/- 10% de l'épaisseur du matériel usiné.

Détails techniques :

Epaisseur de la matière (t) : 0.005 mm - 2 mm

Tolérance : dépendante de l'épaisseur de la matière, en général:

+/- 10 à 20% de l'épaisseur de la matière

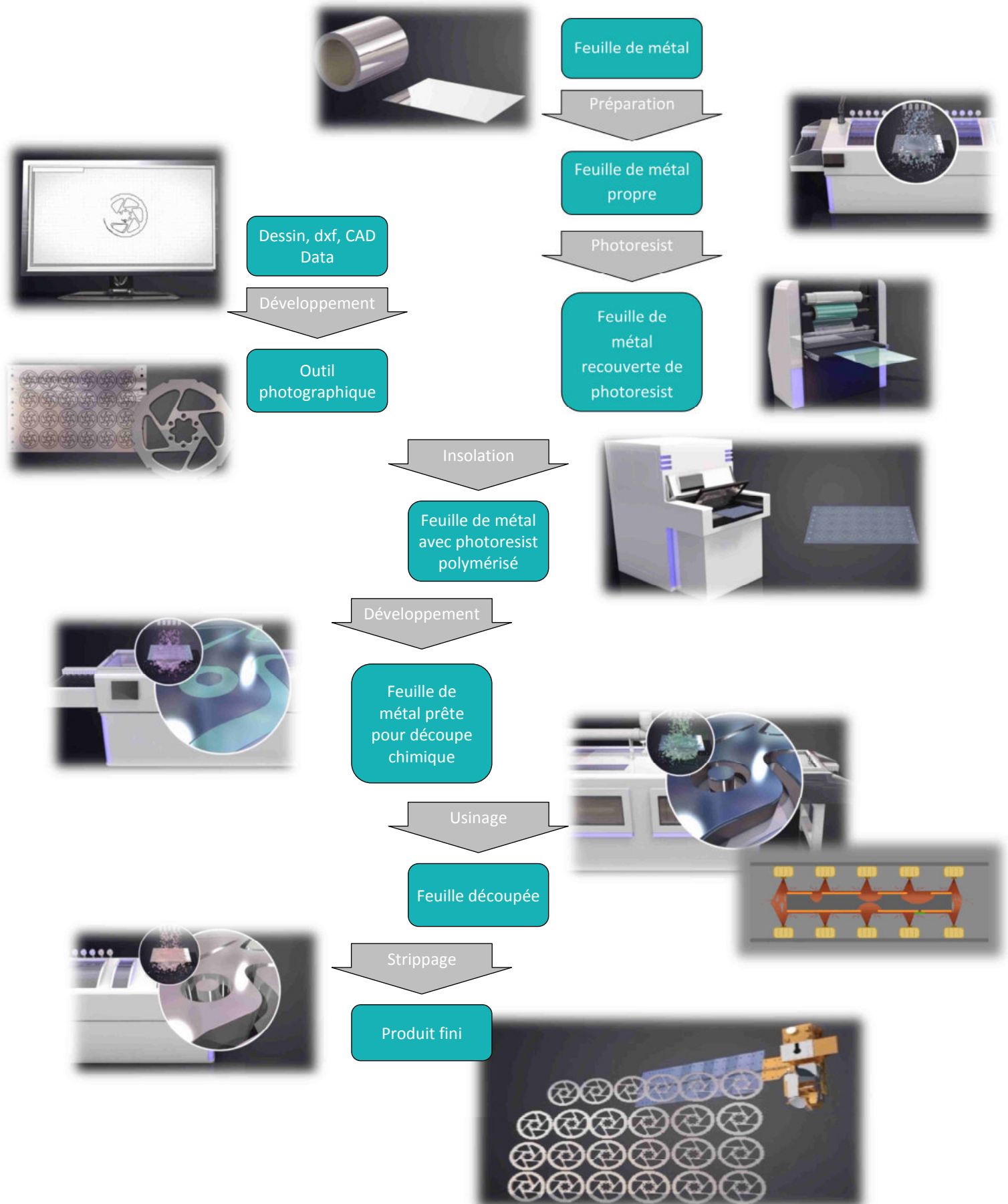
Plus petite ouverture:

$t \geq 0.1 \text{ mm} \Rightarrow \varnothing \text{ minimum} = 0,8 \text{ à } 1 \times t$

$t \leq 0.1 \text{ mm} \Rightarrow \varnothing \text{ minimum} = 1 \text{ à } 1,2 \times t$

Rayon intérieur minimum = $0,5 \times t$

Schéma des différentes étapes du procédé :

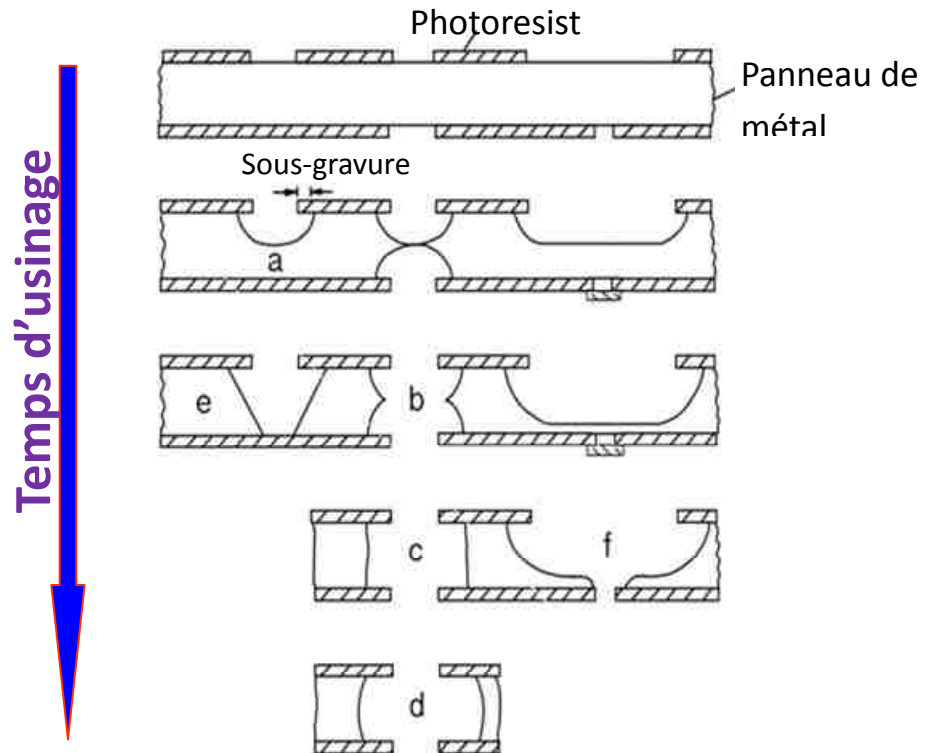


L'attaque chimique est une attaque isotropique qui engendre un phénomène de sous-gravure qui doit être pris en compte lors de la réalisation de l'outillage photographique. La sous-gravure dépend de l'épaisseur et de la nature du matériel à usiner. On peut obtenir différentes géométries au niveau du flanc de la découpe selon les réglages dimensionnels et de formes de l'outillage photographique. Il est également possible d'avoir la découpe et la gravure des pièces en même temps lors de l'étape d'usinage.

Evolution de la découpe (vue de profil) :

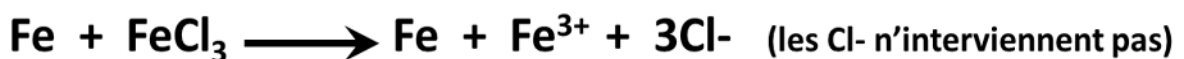
Trous obtenus avec l'usinage photochimique:

- Trou borgne (a)
- Trou conventionnel (b,c,d)
- Trou conique (e)
- Trou à entonnoir (f)



Exemple d'une réaction d'attaque chimique (découpe chimique de l'acier par le perchlorure de fer FeCl_3) :

Espèces en présences



Rédaction d'oxydoréduction

Couples:

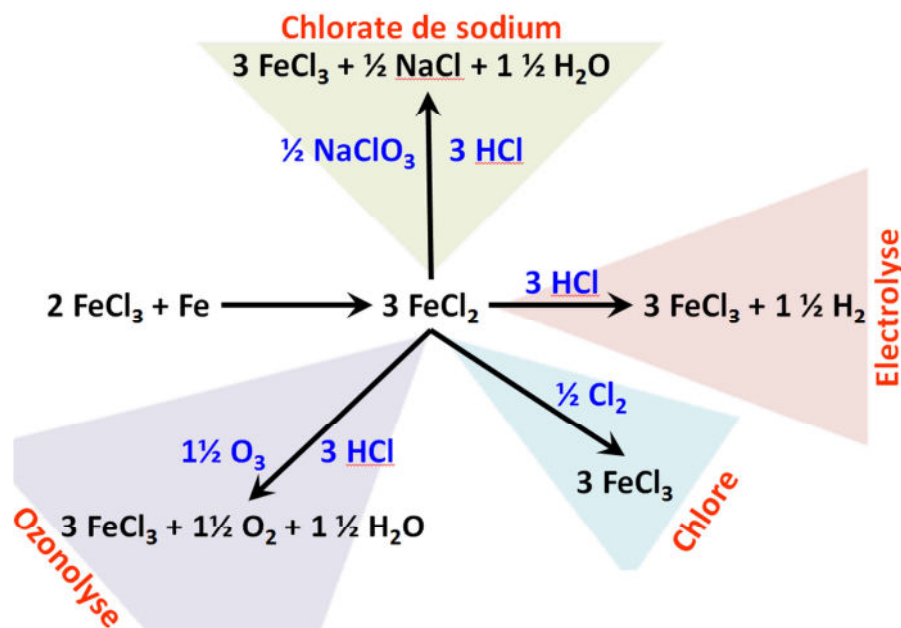
Fe^{2+}/Fe (-0.44V) et $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (0.77V)

Equation bilan de l'attaque chimique:



Afin de limiter la consommation de la solution d'attaque, celle-ci, lorsque cela est possible, est régénérée. La régénération en continue permet également d'offrir une solution d'attaque chimique plus constante et permet donc un meilleur contrôle dimensionnel lors de l'usinage.

Par exemple, pour le perchlorure de fer, très souvent utilisé pour l'usinage des aciers inoxydables et des métaux ferreux, il existe différentes méthodes de régénération : par ajout de chlorate de sodium, d'ozone ou de chlore ou bien encore par électrolyse. Toutes ces méthodes demandent des installations complexes et des appareils de mesures performants capables d'assurer une maîtrise des réactions dans des milieux chimiques relativement agressifs.



Principaux éléments pour le contrôle et le suivi du procédé :

Matériel

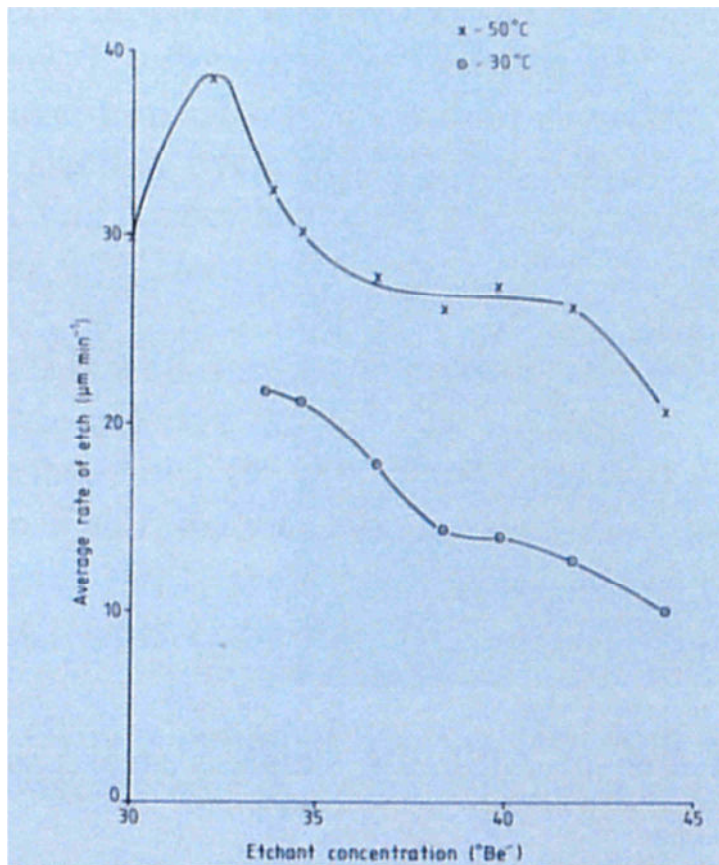
- ☐ Vitesse (m/min)
→ Selon épaisseur
- ☐ Pression (Bar)
→ 2 à 4 Bar
- ☐ Température (C°)
→ 50° (+/-0.5°)

Chimie

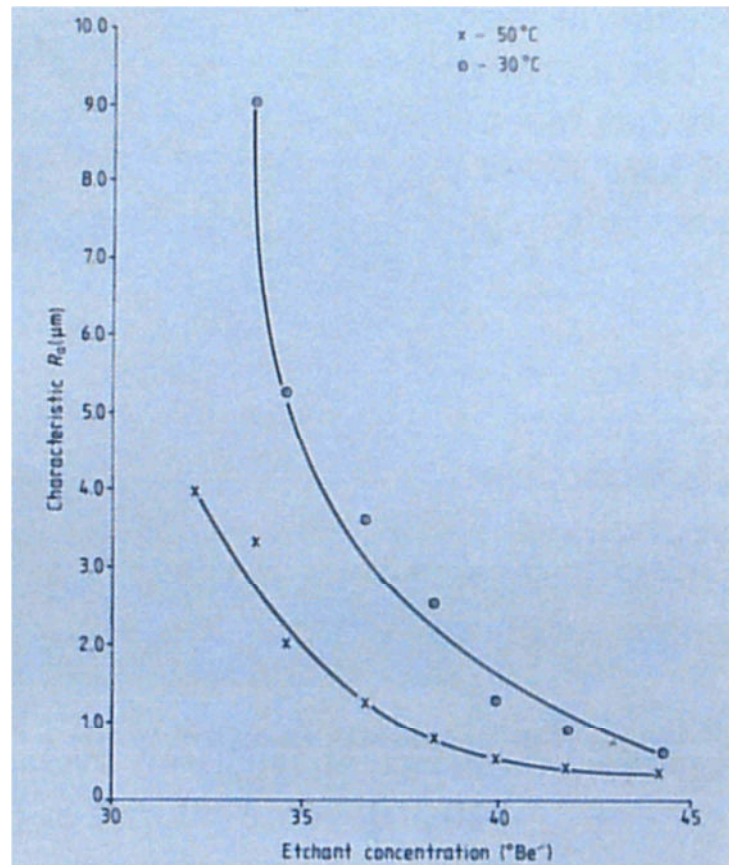
- ☐ Densité (g/dm^3)
- ☐ Conductivité (mS)
- ☐ Potentiel Redox (mV)
- ☐ pH et acide libre (%m)
- ☐ Pollution métalliques (g/L)

Selon les paramètres de la solution d'attaque chimique et du type de substrat attaqué, on obtient des résultats différents au niveau de la vitesse d'usinage et de la rugosité de surface. Cela a une influence sur la qualité d'usinage donc sur l'état de surface des flancs et d'éventuelles zones gravées de la pièce. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre entre vitesse et qualité d'usinage selon la nature du substrat et du résultat souhaité. Il est possible d'obtenir des surfaces très rugueuses jusqu'à des surfaces brillantes. Dans certains cas, la solution d'attaque chimique s'apparente à une solution de polissage chimique.

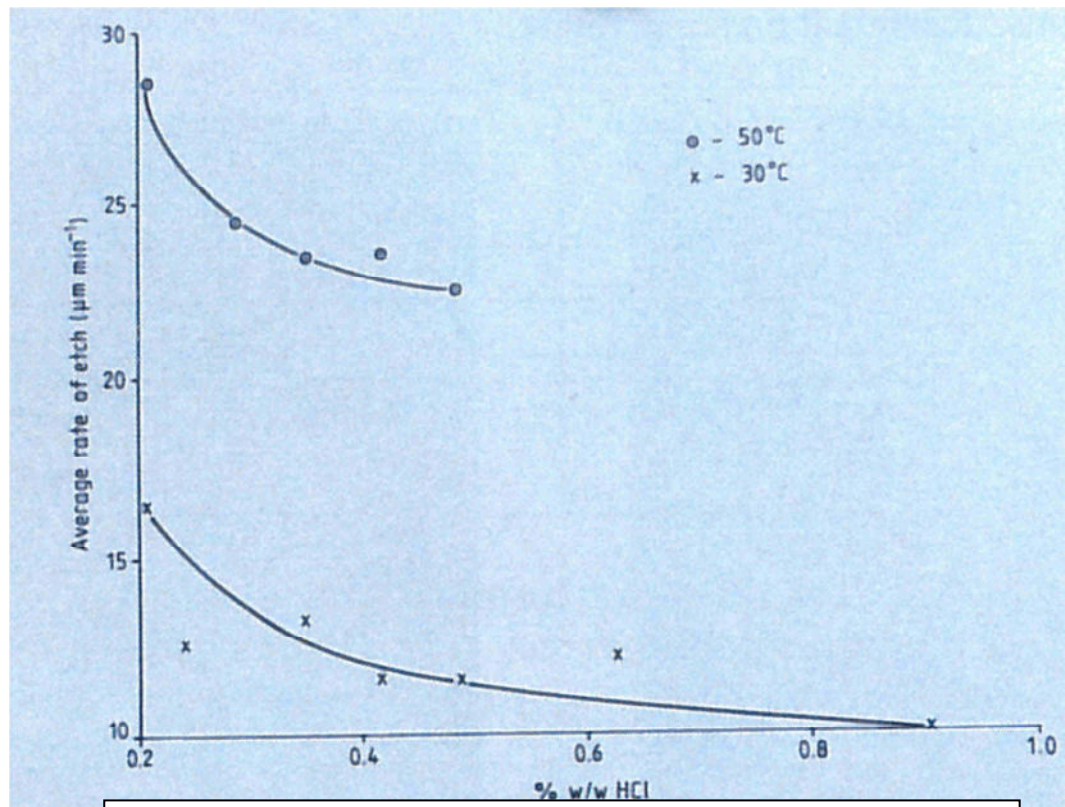
Exemple de variation de la vitesse d'usinage et de la rugosité de surface pour de l'acier inoxydable 1.4301 usiné avec du perchlorure de fer.



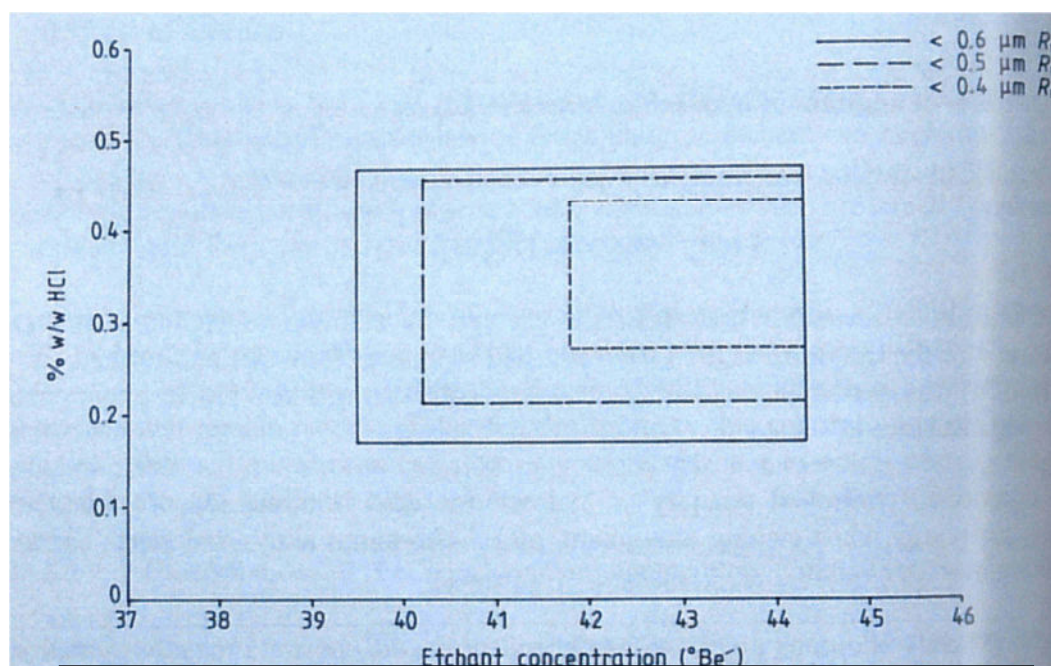
Variation de la vitesse d'usinage ($\mu\text{m}/\text{min}$) en fonction de la concentration en perchlorure de fer ($^{\circ}\text{Be}$) pour une température de 50°C et de 30°C



Variation de la rugosité de surface R_a (μm) en fonction de la concentration en perchlorure de fer ($^{\circ}\text{Be}$) pour une température de 50°C et de 30°C



Variation de la vitesse d'usinage ($\mu\text{m}/\text{min}$) en fonction du pourcentage massique d'acide libre (HCl) pour une température de 50°C et de 30°C



Rugosité de surface R_a (μm) en fonction de la concentration en perchlorure de fer ($^{\circ}\text{Be}$) et du pourcentage en masse d'acide libre (HCl) pour une température de 50°C

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE : D.M. Allen. 2015. "6. Ferric Chloride Etchants" Photochemical Machining and Photoelectroforming. 93-110

Quelques exemples d'applications :

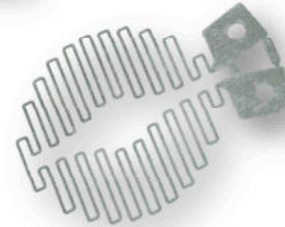
Ressorts plats



Electrodes



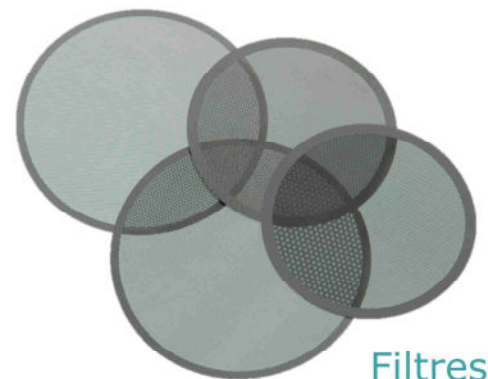
Résistance



Horlogerie



Grilles à café



Filtres

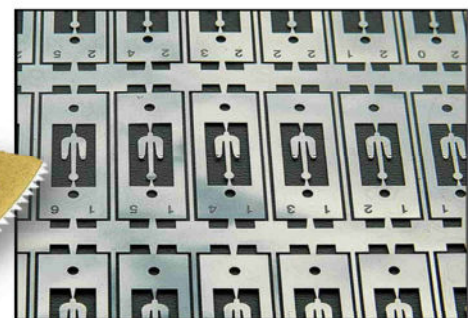
Ciseaux
ophtalmologiques



Lame de scie



Plaquettes
d'identification
X-ray



Ressorts de
valve

Avantages de l'usinage photochimique :

- Précision pour les faibles épaisseurs
- Pas de bavure
- Pas de modification des propriétés physiques du matériel de base
- Faible coût d'outillage
- Possibilité de géométrie très complexe
- Découpe et gravure en un seul procédé

Cette méthode de fabrication peut être une solution performante pour la conception de pièces plates d'épaisseur inférieure à 2mm. Celle-ci peut être très avantageuse, notamment au niveau de ses faibles coûts d'outillages. Ce procédé n'est pas à considérer comme un concurrent des techniques d'usinage traditionnelles mais plutôt comme un mode d'usinage complémentaire. Les différentes combinaisons et associations avec d'autres technologies, telles que la galvanotechnique ou le laser, offrent une multitude de possibilités. L'impact environnemental peut être limité grâce à l'utilisation de systèmes de régénération performants et de stations de traitement des effluents permettant le recyclage des eaux de rinçage. Ce procédé a su convaincre de nombreuses industries de pointe, telles que l'aérospatial ou encore le médical, ce qui témoigne d'une grande force tant en matière d'innovation que de performance et assure ainsi sa pérennité.