

Usinage chimique

par **Henri PELLEREAU**

*Ingénieur de l'École Centrale de TSF et d'Électronique
Directeur Technique de Chimic Métal*

Jean-Michel CUNTZ

*Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers
Centre Commun de Recherches Louis Blériot, Aérospatiale*

et **Franck CORDIER**

*Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Paris
Centre Commun de Recherches Louis Blériot, Aérospatiale*

La partie **Découpe chimique** a été rédigée par **Henri PELLEREAU**.

La partie **Fraisage chimique** a été rédigée par **Jean-Michel CUNTZ** et **Franck CORDIER**.

1. Découpe chimique	B 7 260 - 4
1.1 Réalisation de l'épargne.....	— 4
1.1.1 Dessin des pièces	— 4
1.1.2 Reproduction du dessin	— 4
1.1.3 Préparation de la surface du métal	— 4
1.1.4 Dépôt d'une couche photosensible.....	— 4
1.1.5 Insolation.....	— 5
1.1.6 Développement.....	— 5
1.1.7 Contrôle et retouches	— 5
1.1.8 Autre procédé d'épargne : la sérigraphie	— 5
1.2 Gravure.....	— 5
1.2.1 Action de l'agent d'attaque sur le métal	— 5
1.2.2 Choix de l'agent d'attaque	— 6
1.2.3 Sous-gravure.....	— 7
1.2.4 Précision de la découpe	— 7
1.2.5 Machine à graver	— 8
1.2.6 Contrôle	— 8
1.2.7 Effluents.....	— 8
1.3 Prix de revient	— 8
1.4 Applications	— 9
2. Fraisage chimique	— 10
2.1 Modes de fraisage	— 10
2.1.1 Usinage intégral.....	— 10
2.1.2 Usinage dégressif.....	— 10
2.1.3 Usinage partiel.....	— 10
2.2 Bains d'usinage.....	— 11
2.2.1 Alliages d'aluminium	— 11
2.2.2 Alliages de titane	— 12
2.2.3 Aciers inoxydables	— 13
2.2.4 Alliages de magnésium.....	— 13
2.3 Contrôle	— 13
2.3.1 Contrôle des bains.....	— 13
2.3.2 Contrôle des pièces	— 14
2.4 Installations	— 14
2.5 Conclusion.....	— 15
Pour en savoir plus	Doc. B 7 260

L'usinage chimique est un procédé qui permet l'usinage de pièces métalliques par voie chimique, c'est-à-dire par attaque chimique ou dissolution chimique à l'aide d'un agent adéquat.

Le plus souvent, il s'agit non d'un usinage de toute la surface de la pièce, mais d'un usinage localisé : on utilise alors une **épargne** qui protège localement la surface de la pièce partout où il ne doit pas y avoir d'usinage. Le procédé se ramène alors à deux opérations :

- dépôt d'une épargne protectrice selon le dessin désiré ;
- attaque chimique (on dit couramment gravure) des parties non protégées.

La gravure chimique remonte au 1^{er} millénaire, chez les Arabes, qui utilisaient l'action du sel de nitre (nitrate de sodium) sur les métaux. Au XV^e siècle, l'utilisation de bitume de Judée, déposé et séché sur une plaque de cuivre ou d'acier, permet à l'artiste de dessiner avec une pointe sèche, dégageant ainsi le métal, que l'on attaque ensuite à l'acide nitrique : c'est la gravure à l'eau forte. Cette technique fut utilisée pour la réalisation de plaques décoratives et de clichés d'imprimerie, pour la reproduction de dessins.

Les deux principales formes du développement actuel de l'usinage chimique sont :

- la **découpe chimique** (§ 1), enlevant localement le métal sur toute l'épaisseur de la pièce ; les applications sont extrêmement nombreuses, tout particulièrement en électronique (figure A) et en mécanique ; ce procédé est utilisé pour obtenir des pièces plates de dimensions variées (de 1 mm² à 1 m²) à partir de feuilles ou de plaques d'épaisseur assez faible (10 µm à 3 mm) ;

- le **fraisage chimique** (§ 2), créant des creux dans des surfaces ; les applications sont dans l'imprimerie (héliogravure) et surtout dans l'usinage de pièces importantes employées dans la construction aéronautique (figure B) : éléments de voilures ou de fuselage (plusieurs mètres carrés), dans un but d'allègement des structures.

L'usinage chimique offre, entre autres, l'avantage de ne pas modifier les propriétés mécaniques et métallurgiques des métaux : une pièce en acier trempé ou recuit reste en son état.

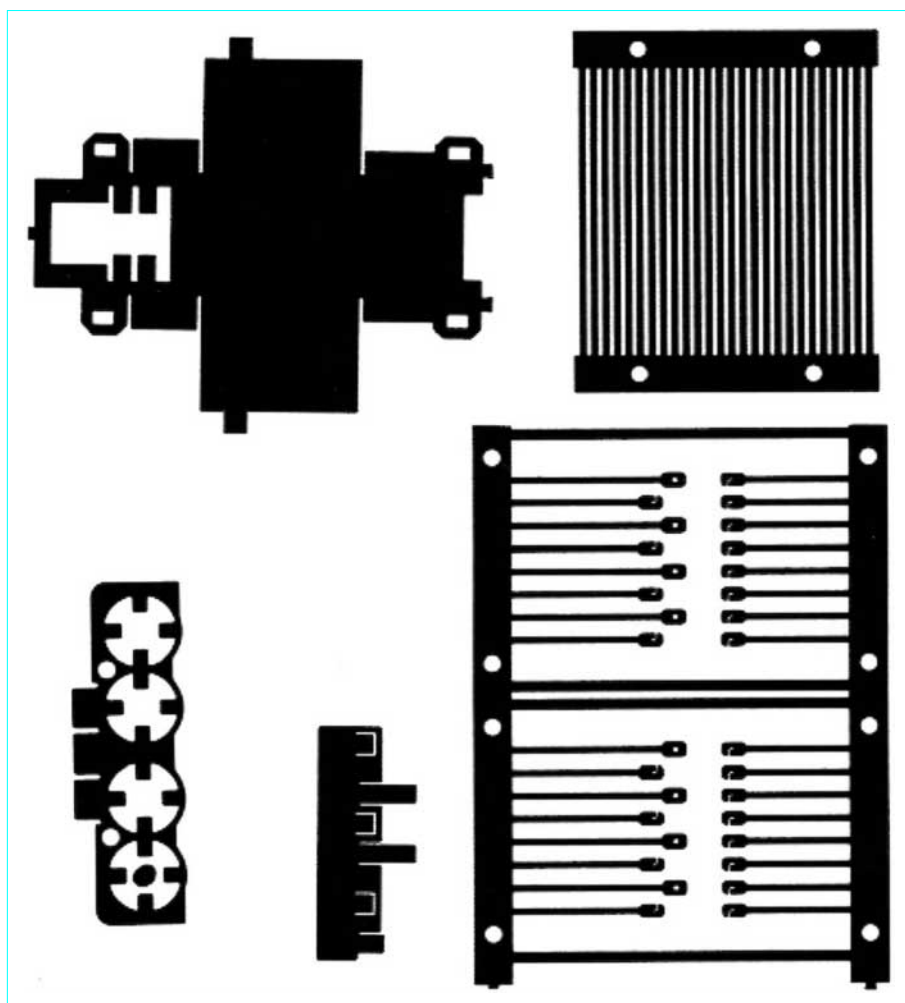


Figure A – Pièces électroniques
obtenues par découpe chimique (échelle 1)

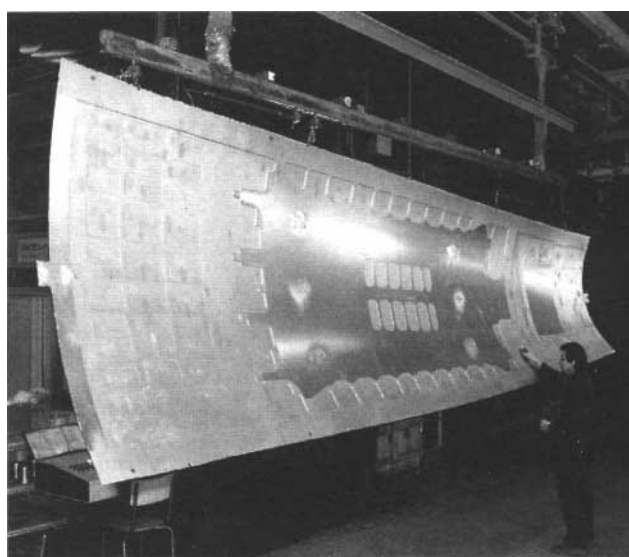


Figure B – Pièces aéronautiques obtenues par fraisage chimique

1. Découpe chimique

La découpe chimique permet la réalisation de pièces planes métalliques minces, par dissolution du métal par un agent d'attaque adéquat, acide ou basique.

1.1 Réalisation de l'épargne

Pour obtenir l'épargne de pièces en série, de façon économique et précise, on passe par un dessin de la pièce, sa copie multiple par reproduction photographique, puis le report de ces copies sur une couche photosensible déposée préalablement sur la pièce.

1.1.1 Dessin des pièces

La réalisation de l'épargne commence par l'établissement d'un dessin, le *master*, à partir d'un plan coté pour une pièce mécanique donnée, d'un dessin artistique ou d'une photo au trait pour les pièces de décoration, de bijouterie ou de publicité par l'objet.

Plutôt que de faire un dessin traditionnel au crayon ou à l'encre, on dessine généralement en coupant directement la couche rouge inactinique de faible épaisseur (100 µm), couchée sur un support transparent stable (polyester), ce qui permet de négliger l'épaisseur du trait de dessin. Cette coupe s'effectue avec une lame de cutter et des instruments de dessin pour des réalisations simples. On garde la pièce en positif ou en négatif en pelant la couche inactinique.

Les techniques industrielles utilisent un coordinographe, appareil qui permet un déplacement XY d'un couteau ou d'une pointe en carbure de tungstène sur une table polaire avec des verniers mécaniques, ou une table de traçage automatique avec un logiciel de dessin assisté par ordinateur (Autocad, Tollcad, etc.). La possibilité pour ces systèmes de stocker des informations, de les modifier et de les visualiser transforme complètement les conditions de travail et apporte un gain de temps appréciable. Ainsi, il n'est plus indispensable de recalculer les coordonnées de chaque point du dessin : l'introduction de la valeur de sous-gravure (§ 1.2.3) dans le logiciel suffit pour obtenir directement le traçage. L'unité de traçage commandée par des moteurs pas à pas est la pièce maîtresse pour la réalisation de masters avec une précision de 20 µm pour un format A0. L'utilisation d'un tracé à grande échelle (grossissement 10) et d'un banc de réduction permet une précision proche de 1 µm.

Un autre système de dessin est le phototraçage par laser, qui utilise des machines informatisées de technologie récente. Le coût d'amortissement élevé de ces équipements est compensé par un gain de vitesse de traçage, la précision restant du même ordre.

1.1.2 Reproduction du dessin

À partir du tracé à l'échelle 1, on réalise plusieurs photos de la pièce sur film positif ou négatif. Ces photos sont disposées de façon compacte, les espaces entre pièces devant être supérieurs ou égaux à l'épaisseur du métal. L'opération se réalise directement sur la traceuse ou à l'aide d'un banc de photomultiplication. On tire ensuite deux copies (pour une découpe double face) de ce film : les masques.

1.1.3 Préparation de la surface du métal

La bonne adhérence des laques photosensibles dépend de l'état de surface des métaux à graver. Les plaques doivent être parfaitement planes, sans rayures profondes ni traces d'oxydation. Leurs dimensions doivent laisser une marge périphérique de 1 cm autour des masques.

Les préparations les plus courantes sont les suivantes :

- les alliages cuivreux demandent une désoxydation, un dégraissage aux ultrasons ; dans certains cas, une action mécanique de ponçage améliore l'adhérence ;
- les alliages ferreux demandent un dégraissage préalable important, car les aciers retiennent énormément les matières grasses, puis un ponçage régulier, afin d'éliminer les oxydations profondes, en terminant par un dégraissage aux ultrasons ;
- les aciers inoxydables sont beaucoup plus difficiles à préparer : on prévoit un dégraissage, un ponçage, une passivation, puis un séchage ; il est très important de ne laisser aucune trace sur le métal ;
- les alliages d'aluminium nécessitent, eux aussi, un ponçage et un dégraissage aux ultrasons.

1.1.4 Dépôt d'une couche photosensible

Il s'agit de déposer un produit photosensible, le *photoresist*, sur le métal. Ce produit sera ensuite polymérisé au travers du masque préalablement réalisé (§ 1.1.2).

Ces produits se présentent sous deux formes : les *laques liquides* et les *films secs*. Ils sont généralement de caractéristique photosensible négative et nécessitent donc un masque négatif (c'est-à-dire sur lequel la pièce est transparente).

La figure 1 illustre les différentes phases du procédé, dans le cas courant d'une découpe double face (avec couche photosensible négative).

Des précautions doivent être prises pour le stockage de ces produits sensibles à la lumière et inflammables.

1.1.4.1 Laques liquides

Les **produits photosensibles négatifs** sont des résines synthétiques à base d'alcool polyvinylique, de phénolformaldéhyde, de polycinnamate de vinyle ou de polyacrylate de vinyle. Ils polymérisent lorsqu'ils sont soumis à une lumière intense riche en ultraviolets et deviennent alors insolubles dans certains solvants, alors qu'ils s'y dissolvaient facilement avant l'insolation.

Les **produits photosensibles positifs** sont détruits par la lumière ultraviolette. Ils sont utilisés pour la gravure très fine des plaques de silicium portant des composants électroniques.

Plusieurs méthodes d'enduction existent.

Au trempé : cette technique, la plus utilisée, permet de sensibiliser les deux faces de la plaque simultanément, avec un système de descente et de remontée verticale contrôlées électroniquement, qui trempe la plaque dans un bac étroit rempli de photoresist filtré. Le contrôle de la vitesse de remontée et de la viscosité permet d'obtenir des épaisseurs de 5 à 10 µm. Cette technique est la plus utilisée, car elle permet d'enduire simultanément des plaques de dimensions et d'épaisseurs différentes.

À la tournette : sur une machine à plateau tournant à une vitesse pouvant atteindre 10 000 tr/min, on dispose la plaque à traiter en la centrant parfaitement. Le photoresist est déposé au centre de celle-ci avec une seringue ou un dispositif automatique comportant un filtre pour éviter les impuretés. Des épaisseurs inférieures à 1 µm sont obtenues et permettent de réaliser des épargnes pour la microélectronique.

Au pistolet ou à la bombe aérosol : cette technique est utilisée pour les pièces légèrement bombées ou les cylindres d'imprimerie ; le pistolet effectue un balayage pendant que le cylindre tourne sur lui-même. On obtient des épaisseurs de 5 à 10 µm.

Dans tous les cas, un local hors poussière est indispensable pour l'enduction, car la laque liquide est très sensible aux poussières, qui peuvent être de dimensions supérieures à l'épaisseur déposée et rendre ainsi la laque poreuse.

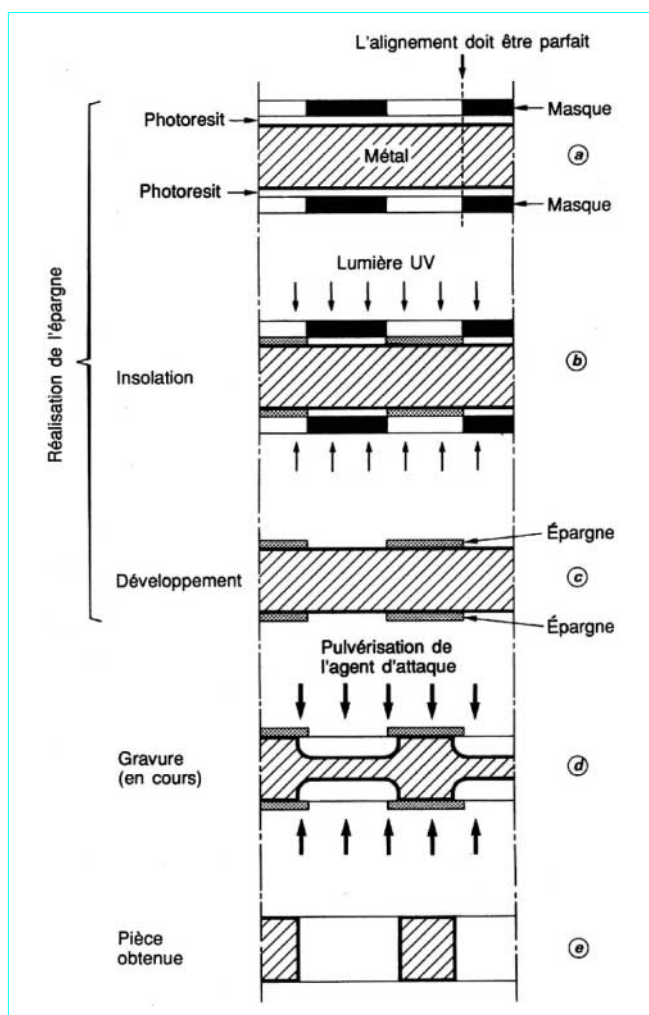


Figure 1 – Mise en œuvre du procédé de découpe chimique double face

Les laques déposées sont séchées en étuve fortement ventilée et filtrée, pour faire évaporer complètement les solvants : environ 30 min à 60 °C, une température supérieure risquant de polymériser la laque.

1.1.4.2 Films secs

Les résines photosensibles, en général à base de monomères acryliques, existent sous la forme d'un film d'épaisseur constante comprise entre 12 et 75 µm, couché sur un support transparent de 100 à 600 mm de largeur en rouleaux de 30 à 100 m de long.

Du fait de leur épaisseur supérieure, ces résines présentent une meilleure résistance que les laques liquides aux agents d'attaque, permettant une diminution des défauts. Par contre, elles ont un pouvoir de résolution médiocre, d'environ deux fois l'épaisseur de la résine et un coût 3 à 5 fois supérieur à celui des laques liquides.

Ces films secs sont étendus sur le métal à l'aide d'un *lamineur* qui enlève la première couche de protection en polyéthylène, puis applique le film sur le métal à graver, sous pression et à chaud (105 à 120 °C), cela pouvant être fait simultanément sur les deux faces. Il reste encore une seconde couche de protection transparente en polyéthylène sur la résine, permettant une manipulation et un stockage hors lumière sans risques.

1.1.5 Insolation

Les pièces ainsi sensibilisées (figures 1a et b) sont placées dans une machine d'insolation comportant un châssis sous vide, une source lumineuse et une commande électronique du temps d'insolation ainsi que des temporisations d'ouverture et de fermeture du châssis sous vide. Ce châssis est constitué de deux feuilles de polyester souple qui épousent la forme des plaques sensibilisées et permettent un contact intime entre le masque et le photoresist. La valeur de la dépression est toujours proche du maximum possible.

La source lumineuse (lampe halogène, à vapeur de mercure ou tube fluorescent) travaille dans l'ultraviolet (0,25 à 0,45 µm). Plus la source lumineuse est ponctuelle et puissante, plus faible sera le temps d'insolation et meilleure sera la définition. Actuellement, on obtient des temps de 15 à 30 s avec des films secs et de 2 à 3 min avec les laques liquides.

1.1.6 Développement

Celui-ci s'effectue par pulvérisation d'un produit qui dissout les parties non polymérisées (figure 1c). Pour les laques négatives, on utilise généralement des solvants organiques. Les films secs, tous négatifs, se répartissent en trois types selon le développement :

- en solvant chloré ;
- en solution semi-aqueuse ;
- en solution alcaline.

Les conditions de développement sont très strictes : un temps trop long risque d'endommager le photoresist polymérisé ; par contre, un temps trop court laisse un voile de photoresist difficilement décelable. Le développement se termine toujours par une pulvérisation d'eau, déminéralisée de préférence.

Après la phase de développement, il est recommandé de faire sécher les plaques en étuve pour durcir l'épargne, environ une demi-heure à 90 °C.

1.1.7 Contrôle et retouches

Il est possible de contrôler l'épargne, visuellement ou avec une loupe binoculaire, pour effectuer directement des retouches, au pinceau ou au marqueur. Cela ne s'applique qu'aux surfaces, car il n'est pas possible de retoucher le bord de l'épargne avec précision.

1.1.8 Autre procédé d'épargne : la sérigraphie

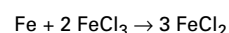
Cette technique d'impression permet de déposer une épargne à travers un écran métallique. Peu précise et souvent simple face, elle s'applique à des pièces décoratives de forme simple et de grande distribution.

1.2 Gravure

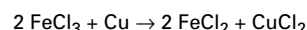
1.2.1 Action de l'agent d'attaque sur le métal

La réaction de l'agent d'attaque sur les parties de métal non protégées se produit directement sur la surface en immersion ou sous la pulvérisation de l'agent agressif.

Par exemple : pour la gravure du fer, on utilise du chlorure ferrique selon la réaction :



Pour la gravure du cuivre, on utilise aussi du chlorure ferrique selon la réaction :



Il y a dissolution d'un atome de cuivre par deux molécules de chlorure ferrique. Le phénomène se poursuit tant que l'on prend soin de renouveler l'agent au contact du métal par agitation ou pulvérisation.

Remarque : il est intéressant de faire ici le *bilan matière* pour deux raisons : le coût de l'agent d'attaque, la maintenance du bain d'attaque.

Ce bilan se présente comme suit.

Masses atomiques : Cu = 63,5 ; Fe = 55,8 ; Cl = 35,4.

Masse moléculaire de FeCl₃ : 55,8 + 3 × 35,4 = 162.

Exemple : la dissolution de 63,5 g de cuivre nécessite $2 \times 162 = 324$ g de chlorure ferrique. La masse volumique du cuivre étant de $8,96 \times 10^3$ kg/m³, la dissolution, par exemple, de 0,1 mm de cuivre sur 1 m² correspond à une masse de cuivre de $10^{-4} \times 1 \times 8,96 \times 10^3 = 0,896$ kg et nécessite donc théoriquement $0,896 \times 324/63,5 = 4,56$ kg de chlorure ferrique (et pratiquement davantage).

1.2.2 Choix de l'agent d'attaque

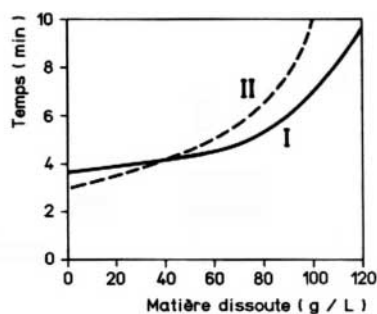
Le choix de l'agent est fortement lié à la nature du métal, au résultat désiré (surface lisse ou granitée), au genre de la pièce (très fragile ou très fine), ainsi qu'à la nature de l'épargne ; cela implique une variété d'agents à des concentrations et des températures diverses. Des mélanges d'agents sont parfois indispensables.

Le tableau 1 indique les principaux agents avec leurs conditions d'utilisation, la valeur du facteur d'attaque (§ 1.2.3) et la vitesse d'attaque. On peut remarquer la présence du chlorure ferrique dans 80 % des cas. Sa solution, peu onéreuse, présente aussi l'avantage d'une manipulation peu dangereuse : toutefois, les règles d'utilisation des produits acides doivent être respectées (gants et lunettes obligatoires).

À titre d'exemple, la figure 2 montre l'influence de la dissolution du cuivre dans la solution de chlorure ferrique sur la vitesse d'attaque. On contrôle la composition du bain en mesurant cette vitesse. Lorsque la vitesse d'attaque a diminué de moitié par rapport à une solution neuve, il est nécessaire de changer la solution. Il est possible également, par adjonction d'un système de régénération continue, de travailler à vitesse d'attaque constante.

Tableau 1 – Principaux agents de gravure

Métal	Agent (concentration)	Température (°C)	Facteur d'attaque (§ 1.2.3)	Vitesse d'attaque (µm/min)
Acier doux.....	{ FeCl ₃ (350 g/L) FeCl ₃ (350 g/L) + HCl (30 mL/L)	35 à 40	1/4	25 à 30
Acier trempé.....	{ FeCl ₃ (350 g/L) FeCl ₃ (350 g/L) + HCl (30 mL/L) HNO ₃ (250 mL/L)	35 à 40	1/3	25
Acier inoxydable.....	{ FeCl ₃ (350 g/L) FeCl ₃ (350 g/L) + HNO ₃	55	1/3	20
Acier au silicium.....	FeCl ₃ (350 g/L)	55	1/3	25
Aluminium et alliages.....	{ FeCl ₃ (100 g/L) NaOH (80 à 200 g/L)	35	1/3	30
Argent.....	HNO ₃ (500 à 900 mL/L)	35 à 45	.....	10 à 25
Chrome.....	{ HNO ₃ (300 mL/L) FeCl ₃ (250 g/L) + HCl (350 mL/L)	80	.....	.....
Cuivre et alliages.....	{ FeCl ₃ (350 g/L) CuCl ₂	35 à 45 55	1/4 1/4	30 à 50 15
Étain.....	FeCl ₃ (350 g/L)	55	1/3	20
Fer.....	FeCl ₃ (350 g/L)	35	1/4	.....
Magnésium.....	HNO ₃ (120 à 150 mL/L)	35 à 45	.....	25 à 50
Molybdène.....	HNO ₃ (200 mL/L) + HCl (200 mL/L)	55	.....	.....
Nickel et alliages.....	FeCl ₃ (350 g/L)	45 à 55	1/3	10 à 25
Or.....	HCl + HNO ₃	35	.....	25 à 50
Plomb.....	FeCl ₃ (350 g/L)	55	1/4	.....
Silicium.....	HNO ₃ + HF	35 à 45	.....	.....
Tantale.....	HNO ₃ + HF	.....	.....	.....
Titane.....	HNO ₃ + HF	35 à 45	.....	.....
Tungstène.....	HNO ₃ + HF	.....	.....	.....
Zinc.....	HNO ₃ (100 à 150 mL/L)	35 à 45	.....	25



I Solution aqueuse de FeCl_3 à 350 g/L (42 degrés Baumé)
II Solution aqueuse de FeCl_3 à 250 g/L (32 degrés Baumé)

Figure 2 – Temps de gravure de 0,1 mm de cuivre en fonction de la quantité de cuivre présente dans le bain (à 43 °C)

1.2.3 Sous-gravure

L'attaque du métal n'est pas parfaitement perpendiculaire à la surface, le long de l'épargne : l'agent d'attaque creuse le matériau sous l'épargne, c'est la sous-gravure (figure 3). En fonction de la nature du métal, de l'agent d'attaque et des conditions d'utilisation, la sous-gravure représente entre le quart et une fois l'épaisseur du métal. Cette sous-gravure est presque constante, pour une gravure donnée et pour des conditions identiques : même métal, même agent, même concentration, même machine à graver, même température. On appelle *facteur d'attaque* le rapport de la largeur de la sous-gravure à l'épaisseur du métal.

Pour déterminer un masque de découpe chimique, il convient d'ajouter tout autour de la pièce la valeur de l'épaisseur du métal multipliée par le facteur d'attaque F .

Par exemple, pour une pièce d'une longueur de 25,2 mm en métal de 0,6 mm d'épaisseur et un facteur d'attaque $F = 1/3$, la longueur du masque est de $25,2 + 2 \times 0,6/3 = 25,6$ mm.

Du fait de la réduction du contour des trous sur le masque, les limites de la découpe chimique sont fixées par les trous de faibles diamètres, surtout pour les métaux de fortes épaisseurs. On considère qu'il faut une *ouverture minimale* de 0,1 mm dans l'épargne pour laisser passer l'agent d'attaque. Le diamètre du trou minimal que l'on peut obtenir dans la pièce ci-dessus est :

$$D = 0,1 + 2 \times 0,6/3 = 0,5 \text{ mm}$$

En règle générale : $D = 0,7$ à $1,5$ fois l'épaisseur du métal.

Pour la découpe des angles extérieurs et intérieurs (figure 4a), les premiers reçoivent spontanément un supplément d'agent d'attaque qui arrondit la forme de la pièce d'environ 0,5 fois l'épaisseur du métal. Les angles intérieurs, par manque d'agent, ne sont pas complètement dégagés : on obtient un rayon d'environ 0,7 fois l'épaisseur. Lorsque l'épaisseur du métal est importante, on peut (figure 4b) lors du dessin surcompenser par une pointe les angles extérieurs et dégager les angles intérieurs pour obtenir des bords plus rectilignes.

1.2.4 Précision de la découpe

La précision de la découpe obtenue est fonction de la nature du métal et de son épaisseur. La forme de la pièce intervient peu sur cette précision qui est donnée au tableau 2.

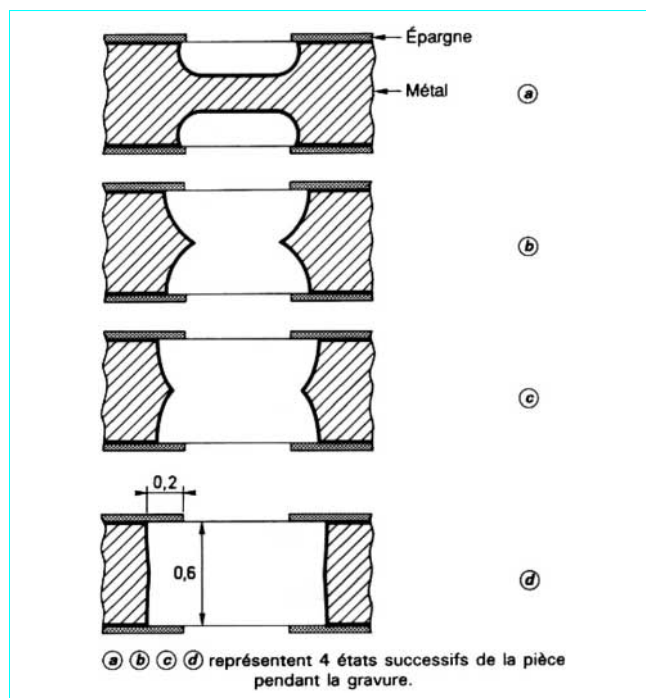


Figure 3 – Sous-gravure

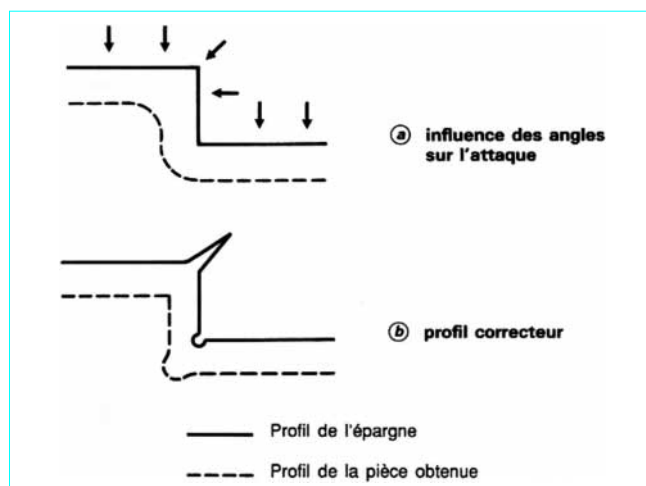


Figure 4 – Découpe des angles intérieurs et extérieurs

Tableau 2 – Précision de la découpe chimique, exprimée en pourcentage de l'épaisseur

Épaisseur	Aluminium	Alliages cuivreux	Aciers	Aciers inoxydables	Alliages de nickel
25 μm	± 15	± 5	± 10	± 10	± 10
50 μm	± 15	± 10	± 10	± 10	± 10
100 μm	± 20	± 10	± 10	± 10	± 10
200 μm	± 20	± 10	± 10	± 10	± 10
500 μm	± 20	± 10	± 10	± 15	± 15
1 mm	± 25	± 15	± 15	± 15	± 15
1,5 mm	± 30	± 15	± 20	± 20	± 20

1.2.5 Machine à graver

La gravure des plaques, préalablement *épargnées*, s'effectue dans des machines à graver en PVC qui pulvérisent l'agent d'attaque sur le métal à l'aide de pompes en titane. Toutes les machines sont conçues pour obtenir une répartition régulière de l'agent sur le métal. Pour cela, elles comportent des buses à jet plein oscillant, dans le cas de machines à tiroir, ou à jet plat effectuant un mouvement de va-et-vient, pour les machines en continu. Ces machines possèdent un système de filtration et de régulation thermique de l'agent d'attaque.

Dans les machines en continu (figure 5), les plaques sont disposées sur un convoyeur qui les entraîne dans la chambre de gravure, puis dans un compartiment de passivation, suivi d'une chambre de rinçage. Le contrôle de la vitesse du convoyeur et de la capacité d'attaque de l'agent permet de produire d'importantes quantités de pièces identiques.

Les machines à tiroir sont utilisées pour la fabrication de pièces variées, tant en épaisseurs qu'en nuances de métal. L'opérateur commande avec une minuterie le temps d'action de l'agent d'attaque. Il peut aussi stopper la machine en cours de gravure et contrôler les pièces dans le tiroir extractible.

1.2.6 Contrôle

Le contrôle des pièces durant ou en fin de gravure est difficile dans un milieu acide. Tous les appareils de mesure en acier, même inoxydable, sont rapidement inutilisables. En fin de gravure, l'opérateur effectue un contrôle par échantillonnage, dans un trou sphérique de la pièce, avec une pige en carbure de tungstène absolument inattaquable. Ainsi, par approches successives, il peut déterminer le temps de gravure idéal (figure 2).

Un contrôle traditionnel, après neutralisation et strippage des pièces, est effectué avec un pied à coulisse ou un projecteur de profil. Le strippage consiste à éliminer l'épargne de la surface des pièces en utilisant un solvant adéquat, généralement du trichloréthylène additionné de chlorure de méthylène, qui ramollit et fragmente la couche d'épargne. On complète par un léger brossage, puis par un rinçage sous forte pression. Il est très important de bien neutraliser les pièces, afin d'éviter l'apparition d'oxydation ultérieure.

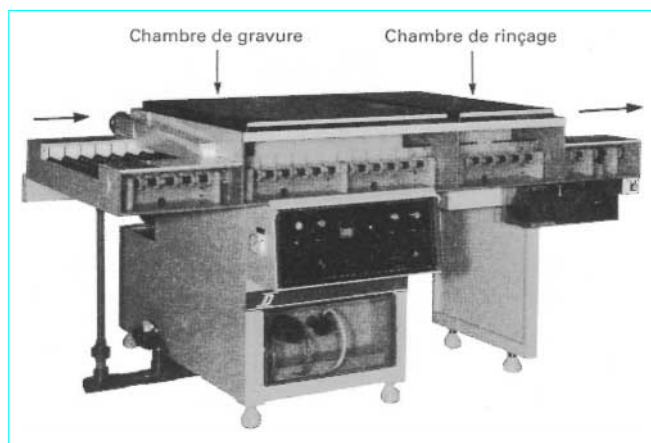


Figure 5 – Machine à graver en continu (doc. Depeltronik)

1.2.7 Effluents

Les effluents provenant des **eaux de rinçage** doivent être absolument neutralisés, car ils comportent des métaux en suspension et ont un pH proche de 0. Une installation de traitement des eaux traditionnelle à base de soude, utilisant un filtre-pression pour la récupération des boues, est indispensable.

Les **bains usés** ne sont pas neutralisables ; ils sont repris par des sociétés spécialisées dans la destruction des déchets non jetables, qui les incinèrent.

Exemple : un kilogramme de chlorure ferrique est acheté 1,3 F ; sa destruction revient à 3,3 F environ. Cependant, le prix de revient total de l'agent d'attaque ne dépasse pas 3 % du prix du métal à découper.

1.3 Prix de revient

Il faut considérer d'une part les pièces prototypes ou les petites séries, d'autre part les productions importantes, comme le montrent les deux exemples suivants (chiffres valables en 1994).

Fabrication de 100 pièces prototypes

Objet : roues codeuses à 100 fentes (figure 6).

Format : diamètre 40 mm.

Matière : bronze au béryllium.

Épaisseur : 0,3 mm.

Coût de l'outillage :

— traçage : 1 500 F ;

— photorépétition 36 poses : 400 F.

Coût matière (800 g de bronze au béryllium) : 300 F.

Coût de la réalisation : préparation, insolation, gravure, strippage, contrôle : 800 F.

Coût total : 3 000 F.

Coût unitaire : 30 F.

Pour comparaison, en procédé traditionnel

Outillage obtenu par électroérosion : 35 000 F.

Réglage et découpe : 1 500 F.

Coût total : 36 500 F.

Coût unitaire : 365 F.

Fabrication de 20 000 pièces

Objet : lames de ressort avec 2 trous oblongs et 2 trous circulaires (figure 7).

Format : 40 mm × 8 mm.

Matière : acier inoxydable pour ressorts.

Épaisseur : 0,2 mm.

Coût de l'outillage :

— traçage : 600 F ;

— photorépétition 200 poses : 600 F.

Coût matière : 12 kg d'acier inoxydable : 500 F.

Coût de la réalisation avec une machine à graver produisant 1 400 pièces/heure : 6 000 F.

Coût total : 7 700 F.

Coût unitaire : 0,385 F.

Pour comparaison, en procédé traditionnel

Outillage : 6 000 F.

Découpe : 4 000 F.

Coût total : 10 000 F.

Coût unitaire : 0,50 F.

Il apparaît, d'après les exemples ci-dessus, que la découpe chimique de pièces complexes en faible ou moyenne quantité ne peut être concurrencée par des technologies traditionnelles.

Pour des quantités importantes (100 000 pièces), la découpe chimique n'est concurrentielle que si la pièce est de faible surface et de faible épaisseur.

1.4 Applications

La découpe chimique permet l'usinage de matériaux très minces ou très fragiles, de pièces très complexes, irréalisables par d'autres procédés, et donne une bonne précision sur les métaux de faible épaisseur. Les bords des pièces sont francs, sans bavures. Elle permet la réalisation de pièces **en quelques heures** à partir d'un dessin coté.

Cependant, la précision de la découpe diminue quand l'épaisseur augmente et il est impossible de faire des trous de diamètre inférieur à 0,7 fois l'épaisseur.

On trouvera à la figure 8 une liste non exhaustive d'applications.

■ **Pièces mécaniques** (figure 8a) : ressorts de flexion plans, entretoises, cales d'épaisseur, rondelles, engrenages, grilles diverses, tamis, clips, freins d'écrous.

■ **Pièces électriques** : contacts plans, pièces de relais, pièces d'interrupteurs, pièces de liaisons électriques (bus, barres), rotors et stators de moteurs, tôles magnétiques.

■ **Pièces électroniques** (figure 8a) : contacts multiples miniatures, sorties de circuits intégrés, répartiteurs d'hyperfréquence, capots de blindage, roues codeuses, têtes de lecture magnétique, cellules de mesure, masques pour microcircuit, écrans métalliques de sérigraphie.

■ **Optique** : réticules de système optique, cadrans, diaphragmes, pièces d'obturateurs.

■ **Pièces diverses** (figure 8b) : bijouterie fantaisie, orfèvrerie, pièces métalliques de marqueterie, décors pour maquettes d'architecture, pièces pour maquettes ferroviaires, automobiles, pièces d'avions et bateaux miniatures, logos publicitaires, *gobos* (sortes de caches) pour projecteurs, pièces publicitaires sur le lieu de vente.

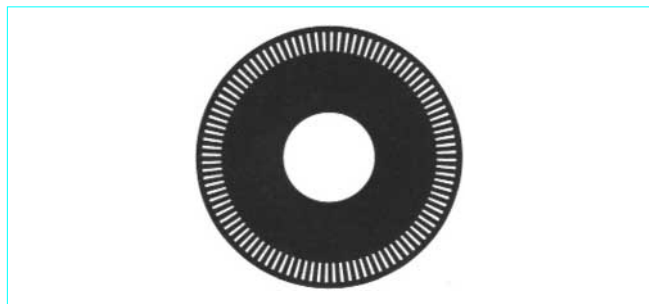


Figure 6 – Roue codeuse à 100 fentes, diamètre 40 mm



Figure 7 – Lame de ressort, 40 × 8 mm, à 4 trous

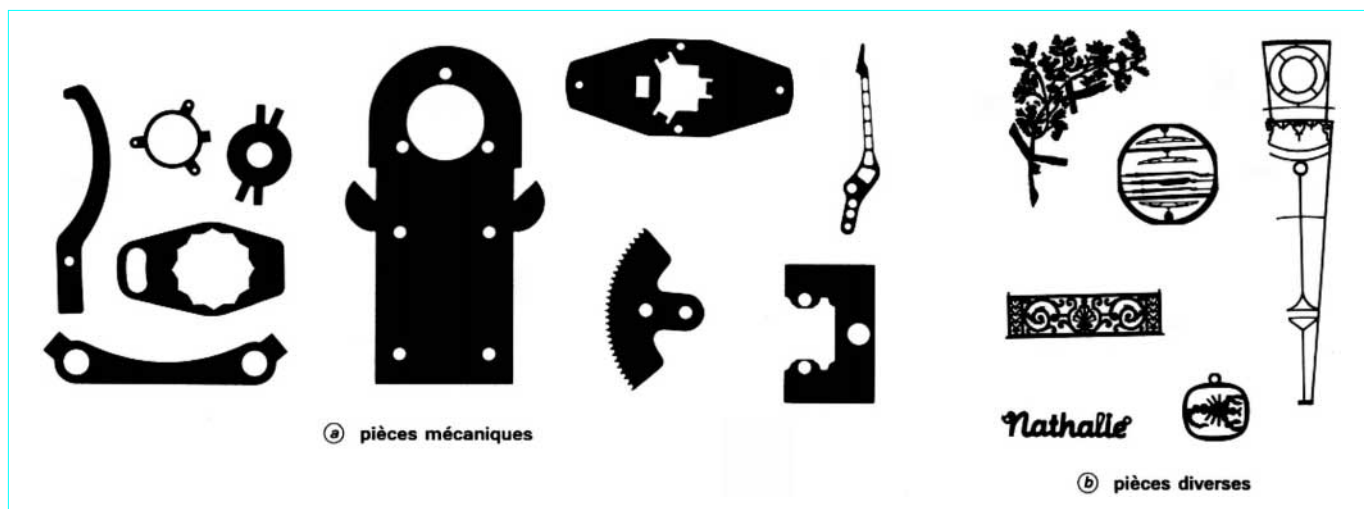


Figure 8 – Quelques applications de la découpe chimique

2. Fraisage chimique

Le fraisage chimique est un procédé d'enlèvement de matière par action chimique. La dissolution du métal lors de son immersion dans la solution d'attaque est un processus de nature électrochimique analogue à celui mis en jeu lors des phénomènes de corrosion. Pour présenter un intérêt industriel, ce processus doit être parfaitement maîtrisé de manière à produire une attaque uniforme et de vitesse constante dans le temps.

Il est couramment appelé *usinage chimique* dans le secteur aéronautique : nous emploierons indifféremment dans la suite *fraisage chimique* ou *usinage chimique*.

Par rapport aux techniques d'usinage conventionnelles, l'usinage chimique des métaux présente des particularités qui justifient ses applications. On peut citer :

- la facilité d'usinage des pièces en forme (développables ou non) ;
- l'usinage sans déformation de pièces de faible épaisseur ;
- le temps d'attaque qui dépend de la profondeur usinée et non de la surface usinée ;
- la possibilité d'usiner simultanément un grand nombre de pièces sur toutes leurs faces.

Le fraisage chimique présente toutefois des inconvénients qui peuvent limiter son utilisation. On peut citer :

- la reproduction de tous les défauts géométriques de la surface initiale (rayures, etc.) ;
- l'imprécision relative des contours d'usinage, qui croît avec l'épaisseur usinée (tableau 11, p. 14) ;
- l'amélioration peu fréquente de l'état de surface ;
- l'augmentation de la dispersion des épaisseurs avec la profondeur d'attaque ;
- la possibilité d'une fragilisation des matériaux ;
- l'impossibilité de réalisation d'alésages ;
- l'usinage irrégulier des soudures ;
- la difficulté d'usiner des alliages coulés.

Le fraisage chimique s'est initialement développé dans l'industrie aéronautique, car cette technique se prête particulièrement bien à certaines applications :

- l'allègement des structures sur des pièces en forme (tôles minces de revêtements de cellule ou de voilure en alliages d'aluminium) ;
- l'usinage de métaux durs (alliages de titane) ;
- l'usinage de pièces de formes complexes.

De plus, les principaux matériaux utilisés dans ce secteur industriel sont, pour la plupart, parfaitement bien adaptés à ce procédé. C'est en particulier le cas des alliages d'aluminium et de titane.

Les propriétés de ce mode d'usinage sont maintenant suffisamment bien connues pour que son choix intervienne dès la conception des pièces, ce qui permet d'exploiter toutes les possibilités de cette technique.

2.1 Modes de fraisage

Le principe de l'attaque permet d'envisager trois modes de fraisage :

- l'usinage intégral : enlèvement uniforme de matière sur l'ensemble de la pièce ;
- l'usinage dégressif : variation progressive de l'épaisseur usinée ;
- l'usinage partiel : diminution locale d'épaisseur.

2.1.1 Usinage intégral

Il permet d'obtenir une réduction de section uniforme sur la totalité de la pièce (figure 9).

Dans la plupart des cas, le fraisage chimique des métaux est accompagné d'un dégagement de gaz (hydrogène, le plus souvent). Des problèmes liés à la position relative des faces et du dégagement gazeux peuvent être rencontrés. Pour obtenir une attaque véritablement uniforme, il peut être alors nécessaire de retourner régulièrement la pièce dans le bain.

Les applications de ce mode de fraisage sont :

- la suppression des contraintes superficielles et des déformations induites par un usinage mécanique antérieur ;
- l'enlèvement d'une couche de métal dur difficile à éliminer par un autre procédé.

Dans ce but, il est nécessaire de prévoir une surépaisseur d'environ 0,1 mm sur chaque face. Il peut être nécessaire de protéger certaines cotes (alésages de précision par exemple).

2.1.2 Usinage dégressif

Du fait de la proportionnalité entre l'épaisseur attaquée et le temps d'immersion dans le bain, la variation progressive de l'épaisseur usinée s'obtient par immersion lente et régulière ou par un cycle d'immersions-émersions alternées de la pièce dans le bain. Connaissant la vitesse d'attaque du bain, il est alors possible de calculer la vitesse d'immersion ou d'émersion. La figure 10 présente les différentes étapes de l'usinage d'une pièce sur une seule face.

2.1.3 Usinage partiel

Le fraisage ne concerne alors que certaines parties de la pièce, d'où la nécessité de préserver de l'attaque chimique par un *masque* (enduit synthétique) les zones qui ne doivent pas être usinées.

Une gamme de fraisage chimique partiel comportera donc les étapes suivantes :

- préparation de surface du métal ;
- masquage de toute la pièce ;
- démasquage partiel des zones à usiner ;
- immersion dans la solution d'attaque pour l'usinage ;
- rinçage ;
- neutralisation éventuelle ;
- rinçage ;
- séchage ;
- démasquage final.

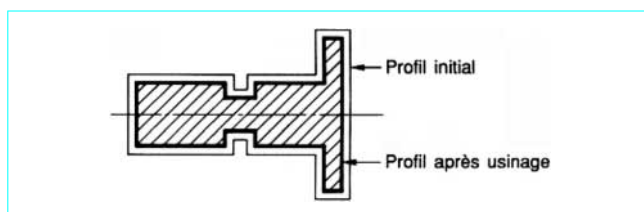


Figure 9 – Exemple d'usinage intégral

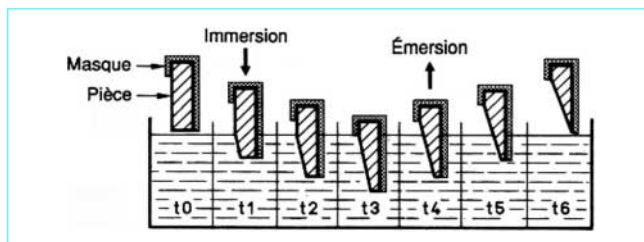


Figure 10 – Étapes de l'usinage dégressif

2.1.3.1 Préparation de surface

Elle a pour but de permettre une adhérence convenable du masque sur le substrat afin de parfaitement protéger les zones qui ne doivent pas être usinées tout en laissant possible son enlèvement par un simple pelage manuel.

Il en résulte que les gammes de traitement sont spécifiques à chaque matériau voire à chaque nuance d'alliage. Elles sont déterminées en tenant compte de la nature du masque. Des indications sur les principales gammes utilisées sont données dans le tableau 3.

Tableau 3 – Gammes de préparation de surface avant masquage de différents matériaux

Alliages d'aluminium (séries 2 000 et 7 000)	— décapage sodique + neutralisation sulfochromique — décapage sulfochromique
Alliages de titane (TA6V ou titane commercialement pur)	— pièces fortement oxydées : sablage sec + décapage fluonitrique — pièces faiblement oxydées : décapage fluonitrique
Aciers inoxydables austénitiques	— dégraissage alcalin — pièces fortement oxydées : décapage fluonitrique
Alliages de magnésium	— dégraissage dans un bain alcalin de pH > 11

2.1.3.2 Masquage

Les masques sont des produits chimiques synthétiques dont il existe actuellement une large gamme adaptée aux différents matériaux et bains d'usinage les plus communément employés.

Les caractéristiques d'un masque sont, d'une part, son adhérence sur le substrat (en relation avec la préparation de surface de ce dernier) et, d'autre part, sa résistance chimique à la solution d'usinage.

Les masques sont couramment appliqués soit au trempé, soit par pistolement à l'aide d'un pistolet sans air (dit *Airless*). L'épaisseur de produit sec varie entre 150 et 300 µm.

2.1.3.3 Démasquage

Le découpage du masque peut être réalisé de manière manuelle ou automatique.

La découpe manuelle est réalisée en utilisant un stylet coupant ou chauffant et un gabarit positionné sur la pièce. Pour réaliser le gabarit, il faut tenir compte du fait que l'usinage pénètre sous le masque et donc que la surface fraisée est supérieure à la surface démasquée d'une valeur p appelée *pénétration sous masque*, qui dépend de nombreux paramètres :

- nature de l'alliage ;
- sens d'attaque par rapport au sens de laminage ;
- profondeur d'attaque ;
- bain d'usinage ;
- adhérence du masque.

Dans la pratique, ce phénomène de pénétration sous masque est chiffré à partir du *facteur d'attaque sous masque* F défini par le rapport de la pénétration sous masque p à l'épaisseur fraisée e (figure 11). Le facteur d'attaque est déterminé expérimentalement ; sa connaissance permet de calculer la valeur de surmasquage et donc de dimensionner parfaitement les gabarits de découpe.

Des valeurs indicatives du facteur d'attaque sont données ci-après :

- alliages d'aluminium : 0,9 à 1,4 ;
- alliages de titane : 0,25 à 0,75 ;
- aciers inoxydables : 0,25 à 0,9.

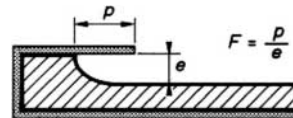


Figure 11 – Définition du facteur d'attaque

Des systèmes de découpe automatique du masque par un faisceau laser sont maintenant proposés. Toutefois la phase de pelage du masque reste toujours manuelle.

Les opérations de découpe et de pelage du masque doivent être réalisées très soigneusement sans entailler le métal, ce qui provoquerait des défauts d'usinage, ni soulever le masque restant, ce qui entraînerait des infiltrations du bain et un usinage irrégulier des bords.

2.1.3.4 Usinage partiel étagé

Par des opérations de démasquage et d'usinage successifs, on obtient des zones avec différents niveaux d'épaisseur (figure 12).

La plage la plus profonde est d'abord démasquée, puis usinée sur une profondeur égale à sa différence d'épaisseur par rapport à celle immédiatement plus forte. Le décalage d'épaisseur se conserve alors, quelles que soient les attaques suivantes, effectuées sur d'autres plages.

Au cours d'un usinage chimique partiel, le relâchement des contraintes superficielles introduites antérieurement peut conduire à des déformations durant le traitement. Pour les éviter, on peut être amené à pratiquer des traitements thermiques ou mécaniques de détensionnement avant l'usinage chimique.

2.2 Bains d'usinage

Les bains doivent permettre l'obtention de résultats de qualité satisfaisante, reproductible et réalisable dans des conditions d'exploitation industrielle acceptables. Outre les paramètres évoqués ci-avant (préparation de surface, masquage, démasquage), la maîtrise du bain d'attaque est primordiale. Il doit en effet répondre aux exigences suivantes :

- la vitesse d'attaque doit être au moins égale à 1 mm/h ;
- les caractéristiques géométriques du substrat après usinage (rugosité, planéité) doivent être acceptables ;
- le potentiel de travail du bain doit être suffisant pour éviter des rajustements trop fréquents ;
- la présence ou la formation d'éléments polluants doit être évitée.

Les paragraphes 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 et 2.2.4 présentent, pour les matériaux les plus couramment usinés dans l'industrie aéronautique, les bains usuels de fraisage chimique.

2.2.1 Alliages d'aluminium

Différents types de solutions à base d'hydroxyde de sodium sont employées. Le tableau 4 regroupe quelques formulations et conditions opératoires types.

Sous l'action de l'hydroxyde de sodium, l'aluminium passe en solution sous forme d'aluminate de sodium selon la réaction :

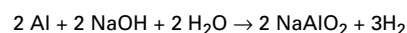


Tableau 4 – Bains d'usinage des alliages d'aluminium

Matériaux	Alliages 2000 et 7000	
Composition		
Hydroxyde de sodium.....	80 à 120 g/L	120 à 150 g/L
Sulfure de sodium.....	5 à 12 g/L	15 à 25 g/L
Glucopentolate de sodium	15 à 20 g/L	
Triéthanolamine		50 à 70 g/L
Aluminium dissous	10 à 100 g/L	70 à 110 g/L
Conditions opératoires		
Température	55 à 80 °C	90 à 110 °C
Propriétés	(bain à 80 °C)	(bain à 105 °C)
Vitesse d'attaque.....	0,8 à 1 mm/h	3,5 à 4 mm/h
Rugosité Ra.....	2,5 à 3,5 µm	0,8 à 1,2 µm

Les sulfures alcalins et les complexants (glucoheptonate de sodium et triéthanolamine) jouent le rôle de régulateurs en évitant la formation de piqûres dans les plans d'attaque perpendiculaires au sens de laminage et en favorisant l'uniformité de l'attaque. Des composés insolubles (boues) constitués principalement d'hydroxyde d'aluminium et de sulfure de cuivre apparaissent dans le bain au cours du traitement.

Le bain est renouvelé partiellement lorsque la teneur en aluminium dissous devient trop importante et que la teneur en soude libre est trop basse, ce qui provoque une diminution de la vitesse d'attaque.

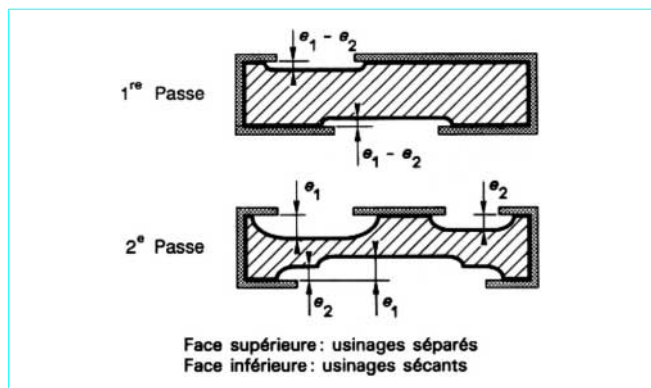


Figure 12 – Principe de l'usinage partiel étagé

Les bains les plus récents, qui travaillent à haute température, présentent par rapport aux bains basse température différents avantages :

- une vitesse d'attaque 3 à 4 fois plus élevée ;
- une amélioration importante de l'état de surface, même pour des profondeurs d'usinage importantes, ce qui se traduit par une augmentation significative des performances en fatigue.

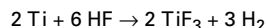
Les boues qui se forment au cours du traitement peuvent conduire à la formation de défauts de surface susceptibles d'affecter la tenue en fatigue du substrat. Un système d'élimination (en continu ou non) des boues du bain peut être nécessaire.

2.2.2 Alliages de titane

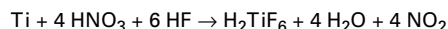
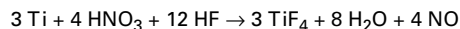
La formulation des bains d'usinage du titane et de ses alliages doit tenir compte des risques de fragilisation du substrat, pouvant entraîner des ruptures différées de pièces, par suite d'une absorption d'hydrogène.

Les bains employés sont généralement constitués de mélanges d'acide fluorhydrique et d'acide nitrique. Des formulations types sont données dans le tableau 5.

L'acide fluorhydrique permet la dissolution du titane et de la couche d'oxyde qui recouvre sa surface. Toutefois il ne peut être employé seul, car l'état de surface serait extrêmement mauvais et le risque de fragilisation non négligeable. Dans ce cas, la réaction serait la suivante :



La présence d'acide nitrique, en ralentissant l'attaque du substrat, permet d'améliorer la rugosité et d'éviter une hydruration excessive du matériau. Plusieurs réactions sont proposées dans la littérature :



Il en résulte une diminution importante du dégagement d'hydrogène. Toutefois, des oxydes d'azote sont émis au cours de l'usinage. L'ajout d'un tensioactif a pour objectif de diminuer le temps d'induction de la réaction et d'uniformiser l'attaque. La présence d'une certaine quantité de titane dissous permet d'éviter que la vitesse d'attaque ne soit trop dépendante de la concentration en acide fluorhydrique.

Il est généralement admis que le rapport pondéral acide nitrique/acide fluorhydrique doit être au moins égal à 10 pour éviter tout risque de fragilisation par l'hydrogène. Les bains travaillant en respectant cette contrainte ont des vitesses d'attaque très faibles et sont plutôt considérés comme des bains de décapage que comme de véritables bains d'usinage.

Tableau 5 – Bains d'usinage des alliages de titane

Matériaux	Titane pur	TA6V	TU2
Composition			
Acide fluorhydrique à 40 %	4 à 8 % en vol.	2 à 4 % en vol.	15 à 18 % en vol.
Acide nitrique ($d = 1,33$).....	13 à 14 % en vol.	13 à 14 % en vol.	45 à 60 % en vol.
Tensioactif.....	oui	oui	oui
Titane dissous.....	10 à 70 g/L	10 à 70 g/L	10 à 50 g/L
Conditions opératoires			
Température	45 °C	40 °C	55 °C
Propriétés			
Vitesse d'attaque.....	1,2 à 1,4 mm/h	0,8 à 1,4 mm/h	0,8 à 1,2 mm/h
Rugosité Ra.....	0,2 à 0,4 µm	0,2 à 0,4 µm	0,2 à 0,4 µm

Dans le cas du TA6V, des risques de fragilisation sont à craindre lorsque la vitesse d'usinage est supérieure à 1,5 mm/h et/ou que la teneur en acide nitrique est inférieure à 1,25 N. Pour s'affranchir de ces risques de fragilisation, il peut être envisagé de réaliser immédiatement après usinage, sous réserve d'une validation préalable :

- un traitement thermique de dégazage sous vide de 1 à 3 h entre 700 et 750 °C ;
- un traitement de décapage (car on peut considérer que l'hydrogène absorbé lors de l'usinage se trouve principalement en extrême surface) dans un bain fluonitrique non fragilisant (par exemple 5 % en volume d'acide fluorhydrique et 40 % en volume d'acide nitrique).

2.2.3 Aciers inoxydables

Le traitement d'usinage doit être précédé d'un traitement de dépassivation. Celui-ci doit être réalisé immédiatement avant usinage sous peine d'obtenir un usinage irrégulier. Des formulations types de bains de dépassivation et d'usinage sont données dans les tableaux 6 et 7. Elles sont adaptées au traitement de pièces en aciers inoxydables austénitiques du type 18-8 stabilisés au titane ou au niobium à l'état hypereutecté.

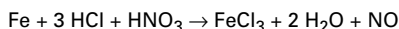
Tableau 6 – Bain de dépassivation des aciers inoxydables

Composition	
Acide chlorhydrique à 32 %	50 % en vol.
Conditions opératoires	
Température	ambiante
Durée	2 à 10 min

Tableau 7 – Bain d'usinage des aciers inoxydables

Composition	
Acide nitrique	2,5 à 3,5 N en NO ₃ ⁻
Acide chlorhydrique à 36 %	50 % en vol.
Acide phosphorique	0,5 à 1,5 mole/L
Tensioactif	oui
Fer dissous	70 à 140 g/L
Acidité	2 à 2,5 N
Conditions opératoires	
Température	60 °C
Propriétés	
Vitesse d'attaque	0,8 à 1,2 mm/h
Rugosité Ra	0,4 à 0,7 µm

L'attaque peut être représentée par la réaction simplifiée suivante :



Lorsque la teneur en métal dissous augmente, la zone de travail se déplace dans le sens indiqué sur le graphique. Le rapport nitrate/acidité diminue de manière à éviter l'apparition de la passivation. L'influence de l'acide phosphorique comme ralentisseur d'attaque est très importante.

L'état de la surface dépend de la vitesse d'attaque. Aux vitesses lentes, on remarque généralement une tendance à la passivation tandis qu'aux vitesses rapides, dues à un excès d'acidité, l'état de surface est de type peau d'orange. Dans ce cas, il est nécessaire de baisser la température de 5 à 10 °C, surtout si la teneur en nitrate est faible.

2.2.4 Alliages de magnésium

Le tableau 8 présente une formulation type d'un bain d'usinage.

Tableau 8 – Bain d'usinage des alliages de magnésium

Composition	
Acide sulfurique ($d = 1,84$)	150 mL/L
Sulfate de sodium	230 g/L
Sulfate de magnésium	85 g/L
Xylènesulfonate de sodium à 40 %	20 mL/L
Conditions opératoires	
Température	40 °C
Propriétés	
Vitesse d'attaque	1,2 mm/h

L'agent d'attaque est l'acide sulfurique. Employé seul il provoque une attaque extrêmement rapide (6 mm/h), inexploitable industriellement. Le sulfate de magnésium et surtout le sulfate de sodium permettent de diminuer la vitesse d'attaque. Le xylènesulfonate de sodium évite la formation de défauts du type caniveaux.

Ce bain présente l'inconvénient de dissoudre incomplètement les éléments d'addition de certains alliages qui se redéposent sur la pièce pour former une couche noire. Dans ce cas, il faut faire suivre l'usinage par une immersion dans un bain de désoxydation dont une formulation est présentée dans le tableau 9.

Tableau 9 – Bain de désoxydation après usinage des alliages de magnésium

Composition	
Anhydride chromique	200 g/L
Conditions opératoires	
Température	60 °C
Durée	3 à 5 min

2.3 Contrôle

La procédure d'assurance qualité généralement mise en place comporte deux aspects :

- le contrôle des bains ;
- le contrôle des pièces usinées.

2.3.1 Contrôle des bains

Des analyses chimiques sont réalisées périodiquement pour déterminer les teneurs des différents constituants actifs du bain. En outre, avant le début des opérations d'usinage, il convient de vérifier le niveau de remplissage de la cuve et la température du bain.

À ces contrôles, des mesures sur éprouvettes peuvent être réalisées pour déterminer :



- la vitesse d'attaque du bain ;
- la teneur en hydrogène après usinage dans le cas du titane et de ses alliages.

La connaissance précise de la vitesse instantanée d'attaque d'un bain est une donnée intéressante, car elle permet de calculer exactement les temps d'immersion des pièces dans le bain (fonction de la profondeur de fraisage).

2.3.2 Contrôle des pièces

2.3.2.1 Défauts d'usinage

Les principaux défauts rencontrés et leur origine sont présentés dans le tableau 10. Ils peuvent, selon le cas, altérer les performances attendues et notamment la tenue en fatigue. Cela peut conduire à mettre des pièces au rebut ou à mettre en place des procédures de réparation de ces défauts.

Tableau 10 – Principaux défauts d'usinage chimique	
Nature du défaut	Origine du défaut
Manque ou excès d'adhérence du masque	Préparation de surface Mauvais traitement avant masquage
Attaques localisées hors des zones usinées	Masquage Porosité du masque Présence de bulles
Caniveau au pied du rayon de raccordement 	Découpe Entaille du substrat due à la pression trop forte exercée par le stylet
Attaque sous le masque sur les contours de la zone usinée	Infiltration du bain sous le masque suite à un décollement du masque lors du pelage
Arêtes irrégulières	Découpe par reprises successives ou outillage défectueux
Raccords après les rayons 	Reprises de découpe
Vaguelettes dans les rayons Hétérogénéité de l'attaque	Usinage Déréglage du bain Présence de boues Mauvais positionnement de la pièce par rapport au dégagement gazeux

2.3.2.2 Contrôle de l'état de surface

Les parties fraisées ne doivent pas présenter de défauts susceptibles d'altérer la tenue en service des pièces. Elles doivent avoir une surface exempte de piqûres, de marbrures, de taches localisées de teintes foncées ou d'autres défauts d'aspect. Doivent faire l'objet d'une attention particulière :

- les congés de raccordement ;
- les zones voisines des surfaces usinées ;
- les entailles dues aux coups de stylet.

Les souillures superficielles provenant d'un rinçage insuffisant et les légères variations de coloration dues au séchage ne sont généralement pas des causes de rebut des pièces.

La rugosité, qui est principalement fonction de l'homogénéité de la matière, doit être uniforme sur toute la surface.

2.3.2.3 Contrôle dimensionnel

Les profils et les épaisseurs de parties fraisées sont contrôlées par tous les moyens appropriés : gabarits de profil, comparateur, appareils de mesure à ultrasons.

D'une manière générale, les tolérances sur les épaisseurs et les contours dépendent de la profondeur de fraisage. Le tableau 11 donne des indications sur l'ordre de grandeur des tolérances réalisables industriellement.

Tableau 11 – Ordre de grandeur des tolérances dimensionnelles		
Profondeur fraisée (mm)	Tolérances sur l'épaisseur (mm)	Tolérances sur le contour (mm)
1	± 0,05	± 0,5
8	± 0,20	± 1

2.3.2.4 Contrôle de forme

Il peut être nécessaire de procéder au cassage de l'arête vive qui peut exister au raccordement du rayon avec la surface masquée.

2.4 Installations

Pratiquement tous les constructeurs aéronautiques et certains de leurs sous-traitants sont équipés d'installations de fraisage chimique. Les plus grandes, destinées aux alliages d'aluminium, ont des dimensions adaptées à la nature des pièces à traiter (panneaux de fuselage de grande taille). Elles peuvent atteindre des longueurs d'environ 10 m et des volumes de 50 000 L.

Sans entrer dans le détail des équipements nécessaires, ces installations peuvent présenter certaines spécificités par rapport aux installations classiques de traitement de surface :

- le volume important du dégagement gazeux nécessite la mise en place de dispositifs d'aspiration très puissants ; parfois des systèmes de hotte embarquée sur le mobile de manutention permettent d'assurer une aspiration continue des vapeurs et de garantir l'étanchéité des enceintes de travail par rapport à l'atelier ;
- la réalisation d'un usinage dégressif impose de disposer d'un système permettant l'immersion et l'émersion progressives des pièces ;
- la présence de boues dans les bains pouvant altérer la qualité des pièces, des moyens d'élimination, en continu ou non, devront parfois être mis en place ; la technique la plus utilisée jusqu'à présent est la décantation ; dans l'avenir, le passage des bains au travers de membranes suffisamment résistantes aux bains concentrés et chauds utilisés devrait se développer ;
- l'homogénéité de la concentration du bain et de la température étant des facteurs prépondérants pour l'uniformité de l'attaque, les cuves sont généralement équipées de pompes permettant la circulation du bain et d'une agitation par air comprimé ;
- la maîtrise de la vitesse d'attaque nécessite une régulation de température à $\pm 2^\circ\text{C}$. Les réactions de dissolution étant souvent exothermiques, les cuves devront être pourvues à la fois de systèmes de chauffage et de systèmes de refroidissement.

2.5 Conclusion

Les applications actuelles du fraisage chimique montrent que ce procédé n'est pas à considérer comme un concurrent des techniques d'usinage traditionnelles, mais plutôt comme un mode d'usinage complémentaire.

Comme beaucoup de procédés industriels de traitements de surface, la réussite du procédé dépend moins d'une connaissance précise des phénomènes que d'une mise en œuvre maîtrisée par l'expérience.

Les prochaines évolutions prévisibles concernant la mise en œuvre du fraisage chimique viseront à résoudre les problèmes d'environnement que pose actuellement cette technique, à savoir :

- l'émission dans l'atmosphère des solvants contenus dans les masques : les solutions envisageables sont l'utilisation de produits de masquage sans solvant ou l'installation de moyens de récupération et de recyclage des solvants ;

- la réduction du volume et le recyclage des boues suite aux restrictions sur l'admission en décharge contrôlée de ces déchets et l'augmentation du coût de ce type de stockage.

Usinage chimique

par **Henri PELLEREAU**

*Ingénieur de l'École Centrale de TSF et d'Électronique
Directeur Technique de Chimic Métal*

Jean-Michel CUNTZ

*Ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers,
Centre Commun de Recherches Louis Blériot, Aérospatiale*

et **Franck CORDIER**

*Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Paris,
Centre Commun de Recherches Louis Blériot, Aérospatiale*

Bibliographie

Anwendungsgebiete der industriellen Ätztechnik.
Chemcut Corp. (1964).

DE MIERRY (E.). – *L'usinage chimique des alliages d'aluminium.* Galvano-organo-traitements de surface n° 536, p. 532-538, mai 1983.

LAJAIN. – *Usinage chimique de pièces en forme en alliage d'aluminium.* Surfaces n° 175, p. 8-20, (1985).

JOY (M.). – *Une installation ultra-perfectionnée d'usinage chimique du titane.* Galvano-organo-traitements de surface n° 580, p. 743-744, nov. 1987.

DINI (J.W.). – *Fundamentals of chemical milling.* American Machinist Special Report 768, p. 113-127, juil. 1984.

WELLER (E.J.). – *Nontraditional machining processes.* Society of Manufacturing Engineers. 2^e édition. ISBN 0-87263-133-8 (1984).

Constructeurs. Fournisseurs.

(liste non exhaustive)

Découpe chimique

Résines photosensibles

Sotrachem.

OCG Microelectronic Materials SA.

Shipley SA.

Morton Thiokol SA.

Produits de gravure

OCG Microelectronic Materials SA.

Prolabo SA.

Parant Michaux (Sté).

Matériel de production

Sotrachem.

Buisine (Sté).

Leguay et Cie.

Elec Joly (Sté).

CBL Système.

Chemical Electronique.

Europrim (Sté Nouvelle).

Fraisage chimique

Masques

Turco France SA.

Socomor.

Produits

Turco France SA.

Prolabo SA.

Socolab.

Sofogé Avond.