

Usinage électrochimique

par **Pierre LECHERVY**

Ancien responsable des Usinages non conventionnels à la SNECMA

1. Principe du procédé	B 7 270 - 2
1.1 Lois générales de l'électrolyse	— 2
1.2 Choix de l'électrolyte	— 3
1.3 Distance interélectrodes (gap)	— 4
1.4 Nature de l'écoulement	— 4
1.5 Tension d'alimentation	— 4
1.6 Élévation de température dans l'électrolyte	— 5
2. Définition de la cathode	— 6
2.1 Définition du type d'écoulement et isolation de l'outil	— 6
2.2 Définition de la forme de la cathode	— 7
2.3 État de surface	— 8
2.4 Rendement	— 8
3. Traitement des rejets	— 8
4. Différents procédés d'ECM	— 8
4.1 Usinage prismatique	— 8
4.2 Perçage	— 8
4.2.1 <i>Shaped Tube Electrolytic Machining (STEM)</i>	— 9
4.2.2 <i>Capillary Drilling (CD)</i>	— 9
4.2.3 <i>Electro Stream Drilling (ESD)</i>	— 10
4.2.4 <i>Electro Jet (EJ)</i>	— 10
4.3 Usinage statique	— 10
4.4 Polissage	— 10
4.5 Rectification	— 10
4.6 Tournage	— 10
5. Constitution des machines	— 11
5.1 Bâti	— 11
5.2 Générateur	— 11
5.3 Dispositif de pilotage de la machine	— 11
5.4 Circuit de l'électrolyte	— 11
6. Avantages et inconvénients	— 12
7. Bilan économique	— 14
Pour en savoir plus	Doc. B 7 270

Parmi les procédés électriques d'usinage, l'*enlèvement de matière par usinage électrochimique (UEC)*, appelé aussi *Electro Chemical Machining (ECM)*, représente un cas particulier : il constitue un « procédé d'usinage moderne » sans que l'on puisse dire qu'il fasse appel à un phénomène physique nouveau ou que les techniques mises en œuvres soient entièrement nouvelles. L'ECM repose sur l'enlèvement de matière selon les lois de Faraday, connues depuis le XIX^e siècle, et aurait pu théoriquement être utilisé de longue date, mais celui-ci est intervenu dans les années 40 aux États-Unis pour usiner des matériaux employés en aéronautique ne pouvant l'être par outils coupants. En fait, on constate que l'ECM est effectué dans des conditions qui sont assez éloignées de celles dans lesquelles les lois fondamentales de l'électrolyse ont été trouvées.

L'ECM est un procédé arrivé aujourd'hui à maturité industrielle avec de nombreuses applications en aéronautique, automobile, etc. Les principaux intérêts de l'ECM sont l'usinage de matériaux conducteurs de l'électricité quels que soient leurs états de traitement, en usinage surfacique et en ébavurage de trous difficilement accessibles.

L'ECM est un moyen d'usinage très performant dont l'industrie n'utilise pas toujours le potentiel de productivité à savoir les propriétés de façonnage de matériaux difficilement usinables mais aussi celle d'avoir un outil pratiquement inusable. Ce dernier point n'est pratiquement jamais pris en considération car les coûts d'outils sont généralement répartis sur des temps de production très longs, contrairement à l'ECM où l'on doit prendre en compte ceux-ci dès la mise en production.

1. Principe du procédé

1.1 Lois générales de l'électrolyse

Nota : se reporter à la rubrique Électrochimie du traité Génie des procédés.

Dans une cellule électrolytique (figure 1), diverses réactions permettent d'expliquer l'enlèvement de métal à l'anode lorsque l'on crée une différence de potentiel entre deux électrodes. Cet enlèvement se produit atome par atome suivant les lois de Faraday qui stipulent que :

— la quantité de métal enlevée ou déposée est proportionnelle à la quantité de courant ;

— les quantités des différents éléments métalliques enlevées ou déposées, pour une même quantité de courant, sont proportionnelles à leur valence-gramme.

Ce qui nous donne comme masse enlevée M pour un élément de masse atomique A et de valence n pendant un temps t et une intensité de courant I :

$$M = \frac{It}{F} \frac{A}{n} \eta$$

avec $F (= 96\,500\,C)$ constante de Faraday et η rendement de l'électrolyse, que l'on peut étendre à un alliage en calculant :

$$\sum \frac{A}{n} = \frac{x_1 A_1}{n_1} + \frac{x_2 A_2}{n_2} + \dots + \frac{x_m A_m}{n_m}$$

x étant le pourcentage du composant m dans l'alliage.

La masse enlevée devient alors :

$$M = \frac{1}{F} \sum \left(\frac{A}{n} \right) It \eta$$

Si l'on prend pour constante de l'alliage :

$$K = \frac{1}{F} \sum \left(\frac{A}{n} \right)$$

l'équation précédente devient :

$$M = Kit \eta$$

Ainsi, la masse dissoute est fonction de l'intensité et du temps, mais non de l'état de traitement du matériau.

Les lois de Faraday fixent la quantité maximale du matériau que l'on peut dissoudre en fonction des valeurs physiques suivantes : temps, masse atomique, valence du métal et intensité du courant. Mais ces lois ne fixent pas de valeur de densité de courant, donc de la vitesse de dissolution à l'anode qui doit, par ailleurs, être compensée par la vitesse d'avance de la cathode pour que l'usinage soit stable (§ 1.3).

Pour obtenir celles-ci, utilisons les équations de la loi d'Ohm :

intensité du courant (I) = tension (U)/résistance (R)

résistance (R)

= distance interélectrodes (y_e) · résistivité (ρ_e)/surface (S)

d'où la densité de courant J :

$$J = \frac{I}{S} = \frac{(U - \Delta U) \psi_e}{y_e} = \frac{v_u \rho_m F}{\sum (A/n)}$$

avec ΔU surtensions aux électrodes,

v_u vitesse d'avance de la cathode,

ψ_e conductivité de l'électrolyte,

ρ_e résistivité de l'électrolyte,

ρ_m densité du matériau.

Dans la pratique, la densité de courant est comprise entre 20 et 350 A/cm², celle-ci pouvant être limitée par la passivation des électrodes et la vitesse de dissolution anodique (figure 2), et la vitesse d'avance de la cathode entre 0,5 et 5 mm/min. Cette vitesse d'avance v_u est d'après ce qui précède :

$$v_u = \frac{(U - \Delta U) \psi_e \sum (A/n)}{y_e \rho_m F}$$

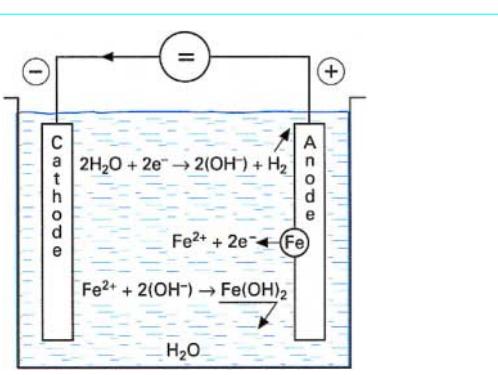


Figure 1 – Schéma d'une cellule électrolytique

Pour illustrer ces équations, prenons deux **exemples** :

— pour l'usinage du fer, avec une densité de courant de 160 A/cm^2 , un électrolyte de conductivité de $0,2 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ et une tension de dissolution ($U - \Delta U$) de 10 V, nous obtenons :

- la distance interélectrodes :

$$y_e = \frac{(U - \Delta U)\psi_e}{J} = \frac{10 \times 0,2}{160} = 0,0125 \text{ cm}$$

- la vitesse d'usinage :

$$\begin{aligned} v_u &= \frac{(U - \Delta U)\psi_e \Sigma(A/n)}{y_e \rho_m F} \\ &= \frac{10 \times 0,2 \times 56/2}{0,0125 \times 7,8 \times 96500} = 0,0059 \text{ cm/s} = 3,6 \text{ mm/min} \end{aligned}$$

— si l'on désire savoir quel est le taux théorique de dissolution du NCK20TA, c'est-à-dire un alliage contenant 62 % Ni, 20 % Cr et 18 % Co, le chrome étant pris hexavalent (sous forme d'ions chromate), le nickel et le cobalt d'ions divalents, nous obtenons avec :

$$\text{Ni : } x = 62 \quad A = 59 \quad n = 2$$

$$\text{Co : } x = 18 \quad A = 59 \quad n = 2$$

$$\text{Cr : } x = 20 \quad A = 52 \quad n = 6$$

$$\rho_m = 8,3 \text{ g/cm}^3 \text{ et } \eta = 1,$$

un volume dissous de $1,54 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{A} \cdot \text{min}$, alors que pour le fer ce volume est de $2,23 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{A} \cdot \text{min}$. La différence du taux d'enlèvement de matière est principalement due à la présence de chrome de valence élevée.

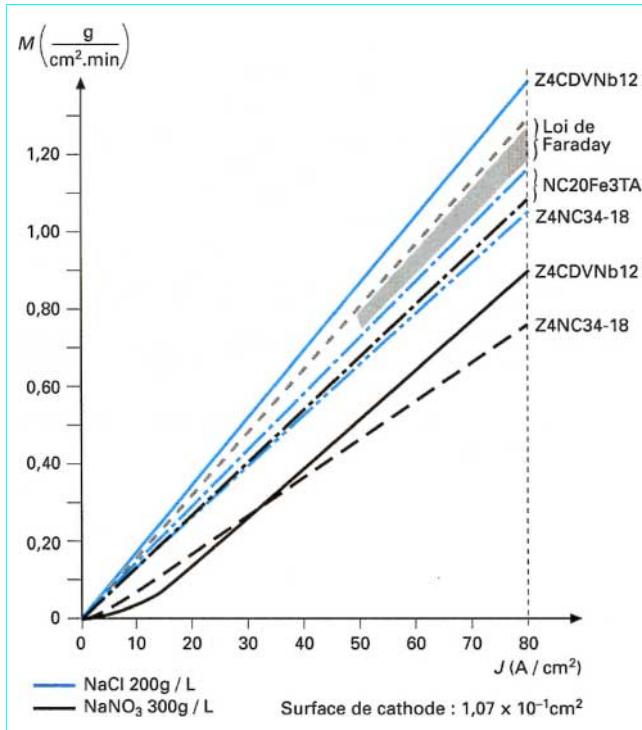


Figure 2 – Courbes de vitesse de dissolution anodique pour quelques alliages courants [5]

1.2 Choix de l'électrolyte

Le schéma d'une cellule ECM reproduit celui d'une cellule électrolytique où l'anode (métal dissous) est la pièce et la cathode (non dissoute) l'outil entre lesquelles circule l'électrolyte (figure 3).

Le rôle fondamental de l'électrolyte est de permettre le passage du courant en vue de réaliser une dissolution anodique pendant toute la durée de l'usinage. La nature de cette dissolution doit être telle qu'il n'y ait pas de formation de produits insolubles susceptibles de passiver (couche isolante) l'anode. Les réactions à la cathode (électrode-outil) ne peuvent pas être négligées : en effet, il est nécessaire d'éviter tout dépôt métallique qui en altérerait la forme et diminuerait la précision de l'usinage.

Les densités de courant utilisées (20 à 350 A/cm²) conduisent à des électrolytes ayant :

- une **forte conductivité électrique** (figure 4) ;
- une **faible viscosité** pour avoir des écoulements uniformes sous de faibles pressions ;
- une **grande capacité thermique** et une **bonne conductivité thermique**, pour évacuer les calories produites par effet Joule, de façon à éviter la dérive thermique qui fait évoluer la vitesse d'usinage par effet de la température sur la conductivité de l'électrolyte ;
- une **température d'ébullition élevée** pour éviter les risques de vaporisation ;
- **pas de risques de toxicité** à froid et en cours d'usinage.

L'électrolyte est constitué par la mise en solution d'un ou plusieurs constituants basiques ou acides dans de l'eau. Sa concentration (50 à 300 g/L pour les bases, 1 à 2 N pour les acides) qui détermine sa conductivité électrique est choisie pour une tension et une vitesse d'avance fixées. **Les électrolytes les plus couramment employés sont à base de chlorure, de nitrate ou de nitrite de sodium** pour tout matériau usiné par l'ECM : aciers, alliages à base de nickel, de cobalt ou de titane, cuivre, aluminium, etc. En revanche, les solutions aqueuses d'acides forts, de bases ou de sels dérivés sont employées sur les mêmes matériaux dans tous les cas où la pression d'électrolyte doit rester faible.

Pour le forage de petits trous ($\phi < 4 \text{ mm}$) de grande profondeur ($L/\phi > 20$), il est recommandé d'employer l'acide sulfurique ou chlorhydrique pour empêcher les précipités, car ceux-ci pourraient gêner l'évacuation de l'électrolyte en obturant localement l'espace annulaire et provoquerait le déplacement de l'outil. L'utilisation des électrolytes acides nécessite des précautions particulières pour éviter les dépôts cathodiques lorsque la proportion des ions métalliques augmente. Pour des trous de diamètres supérieurs à 4 mm, les solutions neutres ou basiques sont généralement préférées.

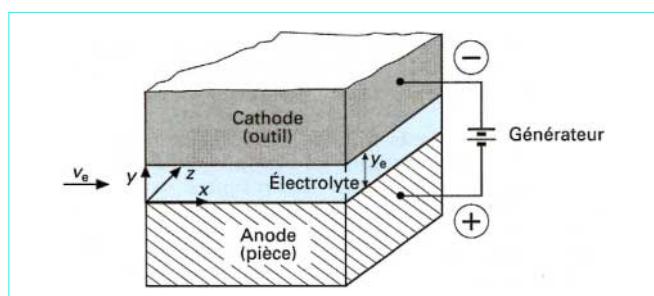


Figure 3 – Gap entre électrodes planes parallèles avec une tension constante

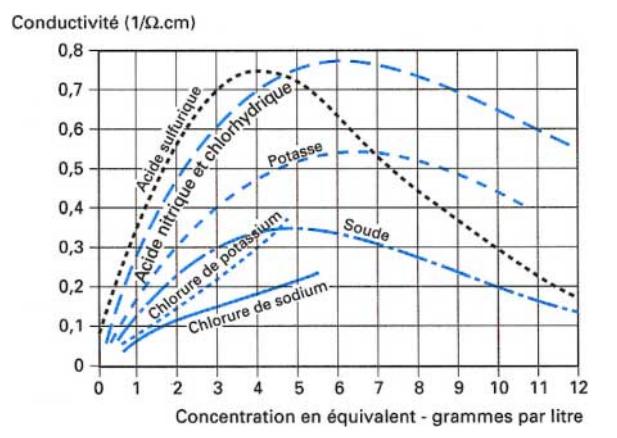


Figure 4 – Variation de la conductivité électrique à 20 °C en fonction de la concentration pour divers électrolytes

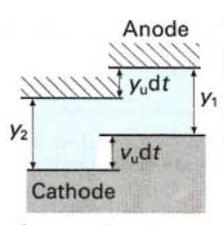
1.3 Distance interélectrodes (gap)

Il est important de connaître, pour une vitesse d'avance v_u donnée et une tension U appliquée, l'évolution de la distance interélectrodes ou gap. Si l'on suppose la conductivité électrique des électrodes très supérieure à celle de l'électrolyte, on peut considérer les surfaces en regard équivalentes et la conductivité de l'électrolyte ψ_e constante dans le gap. La somme des potentiels d'électrodes et des surtensions ΔU est faible par rapport à la tension appliquée U , la loi d'Ohm peut être appliquée avec la tension restante $U - \Delta U$, ce qui permet d'écrire l'équation différentielle du système à partir des lois d'Ohm et de Faraday et en évaluant le rapprochement des électrodes dy pendant un temps dt :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{F} \sum \left(\frac{A}{n} \right) \frac{(U - \Delta U) \psi_e}{\rho_e \rho_m} - v_u$$

$$= \frac{C}{y_e} - v_u$$

$$\text{avec } C = \frac{1}{F} \sum \left(\frac{A}{n} \right) \frac{(U - \Delta U) \psi_e}{\rho_m}$$

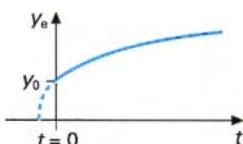


$y_u dt$ = matière dissoute
 $v_u dt$ = avance cathode

Pour une cathode fixe ($v_u = 0$), ce qui est le cas de l'usinage statique, l'équation a pour solution :

$$y_e^2 - y_0^2 = 2 C t \text{ soit } y_e = (2 C t + y_0^2)^{1/2}$$

avec y_0 gap pour $t = 0$.



Le gap croît proportionnellement à la racine carrée du temps.

Si l'avance est uniforme ($v_u \neq 0$), on doit avoir à l'équilibre $dy/dt = 0$, la vitesse d'avance de l'outil compense la vitesse de régression de la pièce et caractérise l'usinage dynamique dans toutes ses variantes.

Pour l'analyse, nous prendrons comme unité de distance l'intervalle d'équilibre y_e et comme unité de temps le temps nécessaire pour le franchir :

$$y' = \frac{v_u y}{C} \text{ et } t' = \frac{v_u^2 t}{C}$$

L'équation devient :

$$\frac{dy'}{dt'} = \frac{1}{y'} - 1$$

La solution pour les conditions initiales $y = y_0$ et $t = 0$, c'est-à-dire $y'_0 = 0$ à $t' = 0$, est :

$$t' = y'_0 - y' + \ln \left(\frac{y'_0 - 1}{y' - 1} \right)$$

et seules les valeurs positives de y' ont un sens physique ($y' = 0$ implique un court-circuit entre les électrodes).

Sur la figure 5, on constate que le temps mis pour atteindre le gap d'équilibre est fonction de la valeur de départ y'_0 et tend de façon asymptotique vers l'équilibre ($y' = 1$).

L'ECM est donc un procédé autorégulé si la tension et la vitesse d'avance restent constantes.

1.4 Nature de l'écoulement

Il est nécessaire de définir la pression de l'électrolyte permettant une vitesse d'écoulement constante et suffisante pour éviter les transferts des ions dissous d'une électrode vers l'autre.

Le type de l'écoulement est défini par le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho_e v_e D}{\mu_e}$$

avec v_e vitesse,

ρ_e densité,

μ_e viscosité dynamique de l'électrolyte,

D diamètre hydraulique moyen pour une fente de largeur ℓ ($D = 2\ell$).

Afin de satisfaire aux impératifs définis précédemment (suppression de la passivation des électrodes, etc.), il est nécessaire d'obtenir un écoulement turbulent, c'est-à-dire avec un nombre de Reynolds supérieur à 3 000. La pression nécessaire pour vaincre les forces d'inertie et les pertes de charge est donnée par les expressions de Bernoulli et Blasius. Ces expressions ne sont pas rigoureusement exactes étant donné que l'on ne tient pas compte de la rugosité des parois des électrodes ; la rugosité moyenne (R_a) des électrodes doit être inférieure à 0,8 µm.

Nota : pour plus de détails, se reporter aux articles consacrés à l'hydraulique dans ce traité.

1.5 Tension d'alimentation

Le choix de la tension d'alimentation U aux bornes du générateur se fait à partir d'un critère technique et d'un critère économique.

Critère technique

La tension doit être suffisante pour assurer la dissolution de tous les constituants de l'alliage (figure 6), ce qui implique que les courbes de polarisation de chaque élément soient compatibles (§ 2.3). La densité de courant est aussi influencée par la tension qui définit le gap (figure 7).

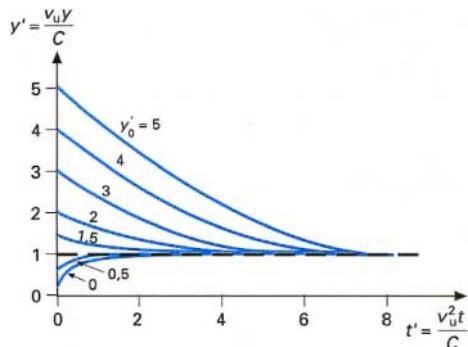


Figure 5 – Évolution du gap pour une vitesse d'avance constante en fonction de différents écartements initiaux des électrodes

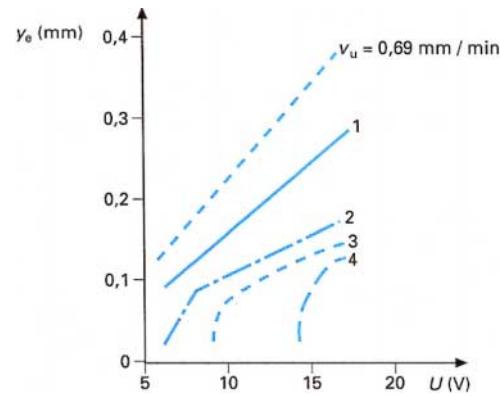


Figure 7 – Variation du gap en fonction de la tension d'alimentation pour une vitesse d'avance donnée

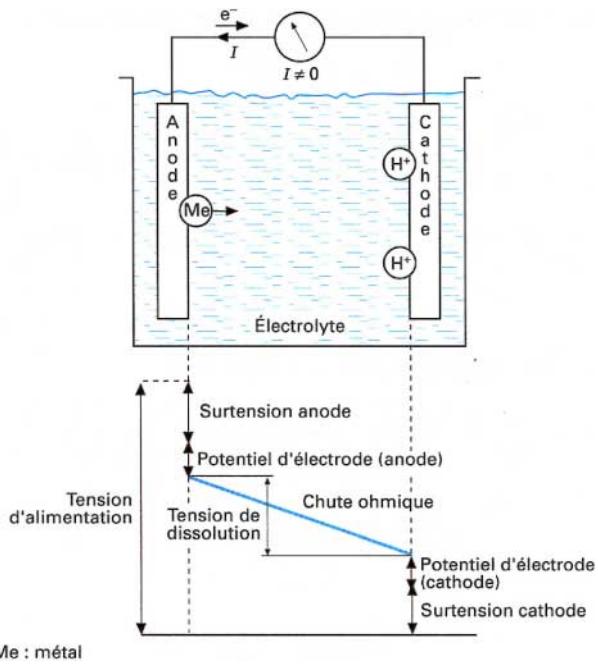


Figure 6 – Tension de dissolution par rapport à la tension d'alimentation

Critère économique

Pour aborder ce paramètre, prenons l'exemple de la dissolution anodique du fer de valence 2, pour lequel il faut fournir 2 électrons par atome de métal à dissoudre. La charge électrique d'un électron est de $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ et un atome-gramme de fer ($56 \text{ g} \approx 7 \text{ cm}^3$) contient 6×10^{23} atomes ; donc, pour dissoudre 56 g de fer, il est nécessaire de fournir 192 000 C (ou A.s). En considérant seulement l'aspect économique, pour dissoudre ces 56 g de fer sur une machine disposant d'un générateur de 5 000 A permettant donc une surface d'usinage (intensité maximale du générateur/densité du courant par cm^2), nous aurons besoin de 90 kW sous 18 V, soit environ 1,5 kW/g, et de 30 kW sous 6 V, soit 0,5 kW/g.

Dans un calcul de prix de revient, il faut aussi prendre en considération la puissance absorbée par la circulation et la régulation de température de l'électrolyte.

Si l'on considère la puissance consommée pour un enlèvement de matière donné, il apparaît nécessaire de travailler à basse tension, l'intensité étant déterminée par des considérations de densité de courant, de gap, d'échauffement de l'électrolyte, etc.

1.6 Élévation de température dans l'électrolyte

Dans une cellule électrolytique, la résistance ohmique peut être exprimée, pour une section droite $s(\text{cm}^2)$, par la relation :

$$R = \frac{1}{\psi_s}$$

d'où l'intensité du courant traversant l'électrolyte a pour valeur :

$$I = \frac{(U - \Delta U) \psi_e s}{Y_e}$$

En négligeant toute la chaleur induite par l'effet Joule, l'accroissement de température $\delta\theta$ d'un élément d'électrolyte compris entre les électrodes pour une longueur de parcours δx est de :

$$\delta\theta = \frac{\psi_e (U - \Delta U)^2}{V_e \rho_e C_e Y_e^2} \delta x$$

C_e représentant la capacité thermique de l'électrolyte.

Le gradient de température est alors :

$$\frac{\delta\theta}{\delta x} = B \psi_e$$

avec $B = \frac{(U - \Delta U)^2}{V_e \rho_e C_e Y_e^2}$

Pour une concentration donnée (par exemple figure 8), la conductivité de l'électrolyte varie linéairement avec θ :

$$\psi_e = \psi_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)]$$

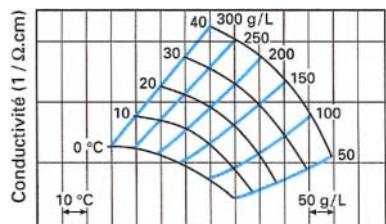


Figure 8 – Conductivité des solutions de chlorure de sodium en fonction des concentrations et températures

avec α coefficient de température de la conductivité égal à :

$$\alpha = \frac{1}{\psi_0} \frac{d\psi}{d\theta}$$

l'indice 0 correspondant aux caractéristiques de l'électrolyte avant son introduction dans la zone d'usinage.

L'élévation de température, à partir de la variation $d\theta/dx = B\psi_e$, devient :

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} [\exp(\alpha B \psi_0 x) - 1]$$

d'où la densité de courant en un point x donné :

$$\begin{aligned} J_x &= \frac{(U - \Delta U)\psi_x}{y_e} = \frac{(U - \Delta U)\psi_0}{y_e} \left[1 + \alpha(\theta_x - \theta_0) \right] \\ &= \frac{(U - \Delta U)}{y_e} \psi_0 \exp(\alpha B \psi_0 x) \end{aligned}$$

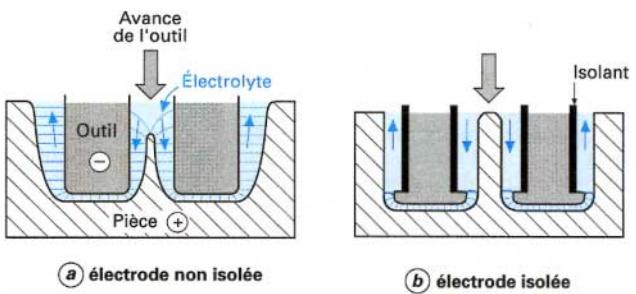
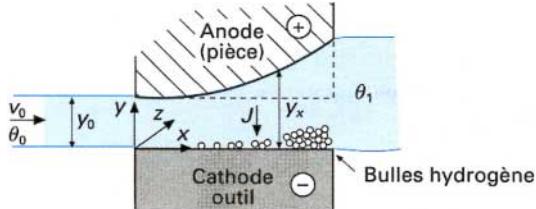


Figure 9 – Influence de l'isolation sur la forme de la pièce

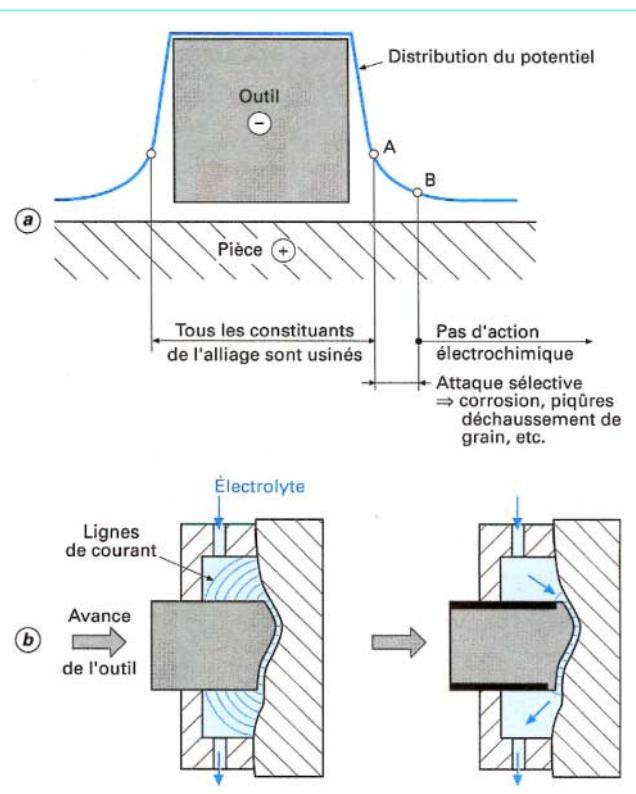


Figure 10 – Effet des courants parasites, avec ou sans isolation

D'après cette équation, la densité de courant croît exponentiellement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'introduction de l'électrolyte. Le taux d'enlèvement varie de façon identique, donc le gap y_e n'est pas uniforme. Par exemple, pour l'électrolyte NaCl, $\alpha = 0,02$ pour 1°C et une évolution de température $\theta - \theta_0 = 50^\circ\text{C}$, le gap est multiplié par 2 entre l'entrée et la sortie, quel que soit leur éloignement. Par ailleurs, les bulles d'hydrogène (taille, répartition, etc.) modifient la conductivité de l'électrolyte et le caractère de l'écoulement rendant toute analyse mathématique fort délicate. La variation du gap entraîne la correction de la forme de la cathode de la même valeur dès sa conception.

2. Définition de la cathode

2.1 Définition du type d'écoulement et isolation de l'outil

L'application des lois d'Ohm et de Faraday met en évidence un paramètre très important pour le gap latéral, l'isolation du corps de la cathode dans sa partie non active. En effet, dans le cas d'une pénétration avec une cathode cylindrique, le gap prend une forme parabolique (figure 9a).

L'isolation permet de rendre la paroi parallèle à l'axe de pénétration (figure 9b) et a une influence sur la distribution de courant à la surface de la pièce en début d'usinage ; en effet, une densité de courant en dehors de la zone d'usinage est indésirable, car elle tend à produire une attaque sélective et des piqûres à la surface de la pièce (figure 10a). Une forte densité de courant est maintenue au niveau de la zone active de l'outil, celle-ci diminuant avec l'éloignement de l'outil, la pièce étant l'asymptote. Le potentiel au point A correspond à la tension de dissolution de tous les constituants de l'alliage usiné ; au-delà, la tension décroissant en fonction de la loi d'Ohm, seuls certains constituants sont attaqués électrochimiquement. Au-delà du point B, aucune dissolution des différents constituants n'est possible. C'est donc dans la zone AB que se produit une attaque sélective ; il faut donc réduire cette zone par l'introduction d'un champ électrique limité par l'isolation dans le gap latéral (figure 10b).

Suivant les types d'usinage, il existe plusieurs types d'écoulements possibles. La forme la plus classique de cathode pour l'usinage prismatique est donnée sur la figure 11a, présentant un canal intérieur d'arrivée d'électrolyte. Il est nécessaire de profiler le raccordement avec la surface active afin d'éviter les turbulences, causes de stries sur les parois usinées. Dans la mesure du possible, pour diminuer la surcoupe, il faut réduire l'épaisseur de la lèvre périphérique qui limite l'isolation. Il est utile, en effet, que celle-ci soit suffisamment faible pour que les écarts relatifs produits par une variation locale de la température d'électrolyte (§ 1.6) n'entraînent que des variations inférieures aux tolérances désirées.

Dans certains cas, il est possible d'éviter les stries produites par une déchirure du film d'électrolyte en réalisant une circulation inverse (*reverse flow*, figure 11b). On place alors la zone de travail dans un boîtier où l'électrolyte est mis sous pression.

Il n'est pas toujours possible de faire arriver ou sortir l'électrolyte par les canaux aménagés dans la cathode elle-même. On force alors l'électrolyte à passer entre la ou les cathodes et la pièce en utilisant une différence de pression entre les deux extrémités de la surface à usiner et en prévoyant des joints latéraux qui imposent la circulation dans la zone active (figure 11c).

Dans tous les cas, il faut veiller à ce qu'aucun courant parasite ne puisse s'établir, notamment lorsque l'on désire découper ou trépaner, pour éviter des piqûres sur la surface d'attaque de la pièce (figure 10). C'est pourquoi toutes les parties non actives de la cathode doivent être isolées, même lorsqu'elles se trouvent à plusieurs millimètres de la zone d'usinage.

Pour faire le choix du type d'écoulement, il faut prendre en compte les avantages et inconvénients de chacun :

— l'**écoulement direct** (figure 11a) est caractérisé par une alimentation en électrolyte par l'intérieur de la cathode et favorise l'état de surface sur la face frontale au détriment de l'usinage latéral. Ce type d'alimentation crée au droit des arrivées un léger défaut (béquet) dont les dimensions sont fonction de la largeur des fentes d'aménée de l'électrolyte ;

— l'**écoulement indirect** (figure 11b) est une alimentation en électrolyte par l'extérieur de la cathode et favorise l'état de surface sur les faces latérales. Dans ce type d'écoulement, le même défaut que dans le précédent existe ;

— l'**écoulement tangentiel** (figure 11c) consiste à faire circuler l'électrolyte entre les électrodes avec l'arrivée par l'un des côtés et la sortie par l'autre. Dans ce type de circulation, la surface d'usinage est exempte de défaut provoqué par la circulation de l'électrolyte, mais la longueur de celle-ci engendre des variations de gap plus importantes (§ 1.6).

Dans tous les cas, un calibrage des sections d'entrée et de sortie homogénéise le film d'électrolyte ainsi que sa répartition entre les électrodes.

2.2 Définition de la forme de la cathode

De façon générale, la forme de la cathode devrait être celle de la pièce diminuée du gap, mais comme nous l'avons vu au paragraphe 1.3, cette forme ne peut être obtenue que si l'on connaît avec précision le gap et si l'analyse des écoulements de l'électrolyte et des lignes de courant du champ électrique a été faite de manière à définir les variations engendrées par les différents paramètres. Une théorie simplifiée, dite **loi cosinus** (figure 12), peut être utilisée de façon satisfaisante quand on peut considérer les lignes de courant sensiblement parallèles les unes aux autres et une conductivité de l'électrolyte constante. Cette loi permet de définir le gap à un point donné du profil par le rapport du gap frontal y_e sur le cosinus de l'angle θ_i de la normale avec la direction d'usinage.

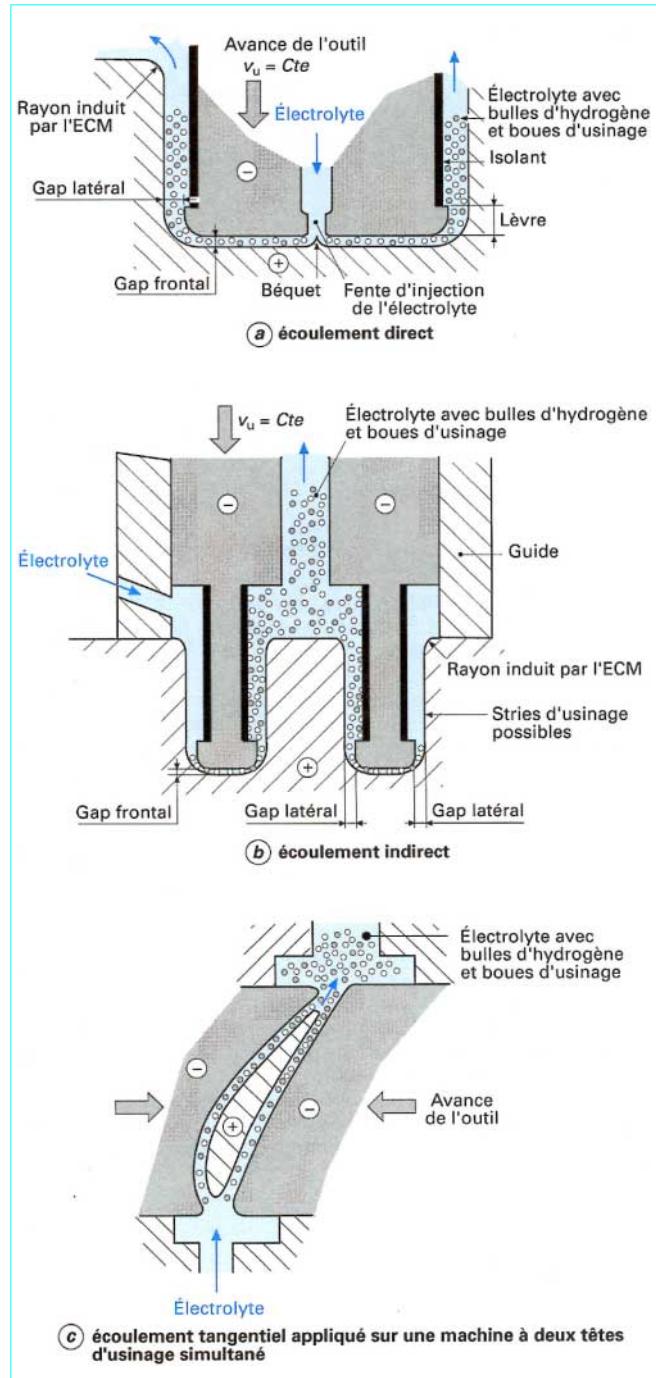


Figure 11 – Différents types d'écoulement avec isolation de la cathode

2.3 État de surface

L'obtention d'une bonne qualité de l'état de surface est un des avantages de l'ECM. Celui-ci dépend de :

— l'écoulement de l'électrolyte, qui doit être le plus uniforme possible. L'écoulement turbulent est préféré à l'écoulement laminaire car il ne provoque pas la formation de sillons ou rides sur la pièce ;

— la nature de l'électrolyte, qui peut provoquer une dissolution préférentielle de l'une des phases de l'alliage ou des joints de grains. En effet, dans le cas de matériaux non homogènes, les éléments ayant un potentiel d'électrode moindre (potentiel de dissolution, cf. article [J 1 606] *Électrochimie : courant-potentiel* dans le traité Génie des procédés), du fait de leur nature, de leur structure ou de contraintes internes, sont dissous plus rapidement ; par contre, un grain de matériau ayant un potentiel d'électrode supérieur à l'ensemble est soumis à une vitesse de dissolution moindre et forme une protubérance sur la surface. Ces considérations montrent que, si la différence de potentiel ou/et la densité de courant croissent, ces variations locales de potentiel de dissolution ont un effet moindre ;

— la densité de courant, mais l'interprétation précédente n'explique pas l'obtention d'un bon état de surface pour les matériaux très homogènes. Si, du fait de la microgéométrie superficielle, il existe des points de dissolution préférentielle il y a en ces lieux une passivation plus importante et diminution de la densité de courant ; à titre d'exemple, la figure 13 montre les variations de la rugosité en fonction de la densité de courant pour deux types d'acières.

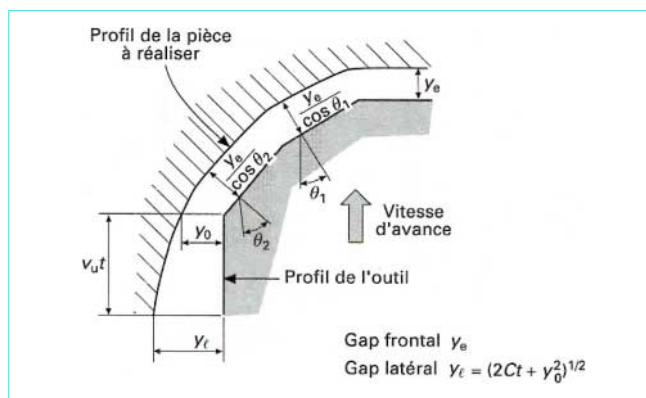


Figure 12 – Évolution du gap en fonction de la forme de la cathode

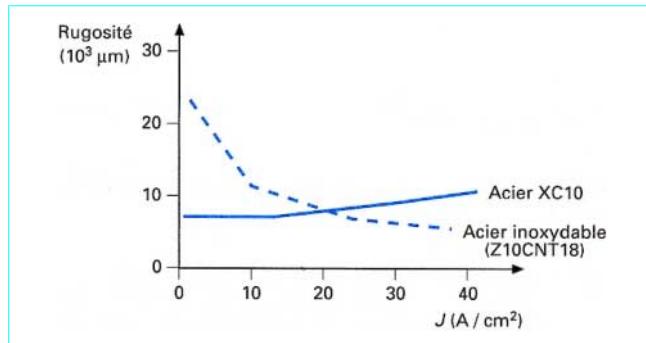


Figure 13 – Rugosités en fonction de la densité de courant pour deux aciers

2.4 Rendement

L'enlèvement théorique de matière obéit à la loi de Faraday, c'est-à-dire qu'il est proportionnel au courant appliqué. En réalité, l'énergie nécessaire est liée au rendement de dissolution η qui dépend de l'électrolyte employé et de la nature du métal usiné ; dans les cas les plus favorables, il est voisin de 100 %, mais peut n'atteindre que 80 % dans des conditions opératoires inadéquates.

3. Traitement des rejets

Ce point bien que non spécifique à l'ECM doit être pris en compte pour tous les rejets que l'industrie va produire dans les années à venir :

— les composants des rejets sont très bien identifiés, car ils proviennent d'une dissolution électrochimique d'un alliage ;

— les composants sont regroupés sous forme de boues plus ou moins sèches suivant le principe de filtration retenu et que l'industrie chimique sait traiter. Ce point induit un coût supplémentaire qui doit être pris en compte dans tous les calculs de rentabilité ;

— des études sont actuellement en cours dans différentes unités de recherche tant en France que dans le monde pour réduire les pollutions et les coûts de traitement. Les principales voies d'exploration sont la complexation liquide-liquide pour la valorisation des boues à base d'éléments à hautes valeurs ajoutées (cobalt, nickel, titane, etc.) et l'inertage des boues pour les éléments dont la valorisation n'est pas économiquement rentable.

4. Différents procédés d'ECM

Les applications découlent des particularités du procédé qui sont de pouvoir usiner des matériaux conducteurs de l'électricité, indépendamment de leurs caractéristiques mécaniques, notamment de leur dureté et de reproduire aisément les formes complexes exécutées une fois pour toutes sur une cathode qui est exempte de toute modification dimensionnelle.

4.1 Usinage prismatique

Il s'agit principalement de la réalisation d'outillages de matriçage, d'emboutissage, des empreintes de moules employés en fonderie ou dans l'industrie des plastiques, des aubages de turbomachines, etc.

Parmi les usinages prismatiques, citons l'usinage de forme (figure 14a), le brochage (figure 14b) pour lequel la vitesse d'avance de la cathode v_a ($v_a = v_u / \cos \alpha$, α angle de pente de l'outil) est rapide tout en ayant une vitesse de dissolution identique aux autres procédés, et la découpe de précision et le trépanage (figure 14c).

4.2 Perçage

De nombreuses méthodes de perçage avec des électrolytes acides pour des diamètres inférieurs à 3 mm avec de grands rapports profondeur/diamètre (50 à 200) ont été développées pour les besoins de l'aéronautique, mais celles-ci peuvent être facilement transposées aux autres industries.

4.2.1 Shaped Tube Electrolytic Machining (STEM)

Cette technique utilise un tube en titane isolé extérieurement avec une résine résistant chimiquement et déposée par électrophorèse. La lèvre d'usinage est exposée au métal. La cathode est placée dans un guide pour en contrôler la position et la direction. L'électrolyte est introduit sous faible pression (vitesse d'électrolyte faible) par l'intérieur du tube (tableau 1) ; un potentiel constant de 6 à 15 V est appliqué à la cathode durant le perçage. Pendant une courte durée, la polarité des électrodes est inversée ($U < 7$ V pendant 0,3 à 1 s) pour « nettoyer » la lèvre de l'outil, c'est-à-dire enlever le dépôt à la cathode engendré par la faible vitesse de l'électrolyte. Il en résulte un trou légèrement irrégulier présentant des variations périodiques du diamètre liées à celles des alternances des polarités. Le perçage est réalisé à une vitesse constante (0,5 à 5 mm/min) avec un gap compris entre 0,07 et 0,15 mm.

Le procédé STEM peut être utilisé pour percer simultanément plusieurs trous ayant des axes non concourants jusqu'à 17° et un rapport profondeur/diamètre pouvant atteindre 200 et même plus.

4.2.2 Capillary Drilling (CD)

Contrairement au STEM, le Capillary Drilling (tableau 1), appelé aussi *ElektroChemisches Feinbohren (ECF)* ou *Perçage Électrochimique Fin (PEF)*, utilise un capillaire en verre (ou autre isolant), avec un fin fil d'or ou de platine inséré à l'intérieur et servant de conducteur électrique. La distance entre les deux conducteurs étant plus grande que pour le STEM, la résistance du tube électrolytique est plus importante et nécessite des tensions continues de 60 à 300 V.

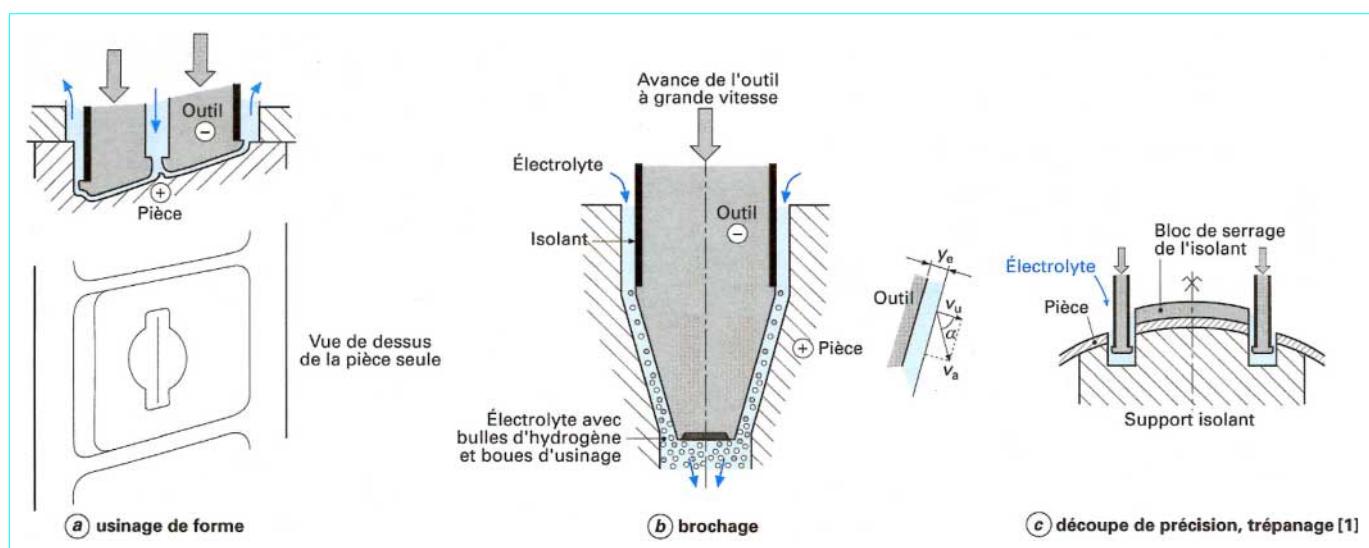


Figure 14 – Usinage prismatique

Tableau 1 – Caractéristiques des différents procédés de perçage

Paramètres	STEM	CD	ESD	EJ
Électrolyte				
Tension (V)	HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , HCl 6 à 25	HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , HCl 60 à 300	HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , HCl 200 à 700	HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , HCl 800 à 1 200
Pression (bar)	2 à 10	3 à 20	3 à 10	10 à 100
Vitesse d'avance de la (des) cathode (s) (mm/min)	0,5 à 3,5	0,5 à 3,5	0,5 à 3,5	–
Rapport profondeur/diamètre	200	100	50	5
Diamètre (mm)	0,50 à 5,00	0,15 à 2,00	0,15 à 1,00	0,3 à 1,00
Tolérances (mm)	± 0,030	± 0,015	± 0,030	± 0,050

4.2.3 Electro Stream Drilling (ESD)

Cette technique (tableau 1) est similaire au *Capillary Drilling* dans laquelle on utilise un tube de verre aminci à son extrémité pour guider le flux d'électrolyte. La distance entre les deux conducteurs encore étant plus grande que la précédente, la résistance du tube électrolytique est plus importante et nécessite des tensions continues de 200 à 700 V.

4.2.4 Electro Jet (EJ)

Dans cette technique (tableau 1), le guide du jet électrolytique est supprimé ; seule la pression assure la cohérence du jet. Ce procédé est la limite inférieure pour des diamètres réalisables par des procédés de perçage électrochimique. La tension nécessaire est comprise entre 800 et 1 200 V.

4.3 Usinage statique

L'usinage à vitesse de cathode nulle, dit *statique* (figure 15) est employé pour parfaire le contour et l'état de surface d'une pièce brute de fonderie ou de matriçage, pour ébavurer ou pour exécuter des chambrages ou gorges dans des alésages.

4.4 Polissage

Le polissage électrochimique est une des premières applications industrielles connues des procédés électrolytiques ; en effet, cette technique est très utilisée dans les études de structures métallurgiques pour préparer des échantillons (sans électrode-outil). Citons également le polissage de pièces après usinage par électro-érosion pour améliorer l'état de surface mais aussi enlever les contraintes engendrées par la fusion du matériau dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

4.5 Rectification

La rectification électrochimique (figure 16), ou *Electro-Chemical Grinding (ECG)*, est une forme de l'ECM qui emploie comme cathode un disque tournant avec ou sans abrasif.

4.6 Tournage

Cette application d'ECM est très peu développée en dehors de l'aéronautique et existe en deux versions comme le tournage conventionnel (axe de la pièce vertical ou horizontal). Le tournage électrochimique est dérivé de l'usinage prismatique par l'adjonction d'un axe de rotation de la pièce (figure 17).

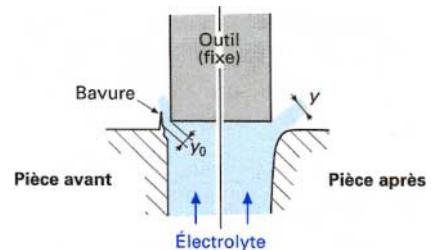


Figure 15 – Usinage statique : exemple de l'ébavurage

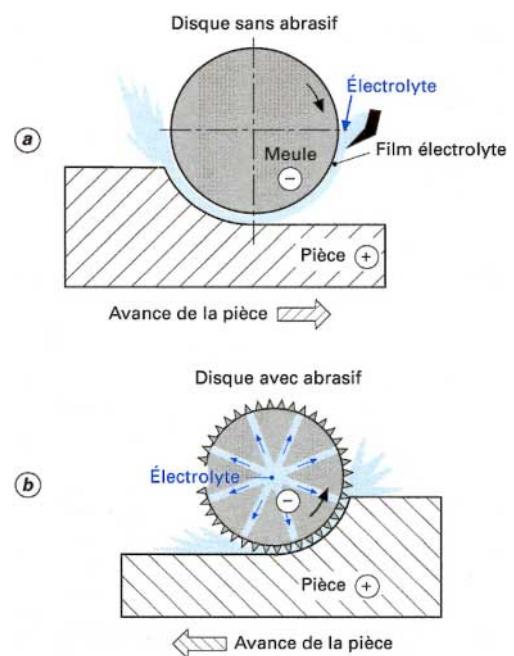


Figure 16 – Rectification électrochimique

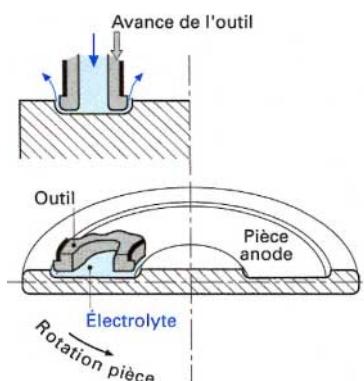


Figure 17 – Tournage électrochimique

5. Constitution des machines

Les machines sont élaborées autour de données théoriques de la dissolution anodique (figure 18), définissant avec précision les différentes fonctions de la machine.

5.1 Bâti

On a vu (§ 1.4) que la faible distance comprise entre la pièce à usiner et la cathode nécessite une pression d'électrolyte élevée (25 bar) pour assurer le débit nécessaire. Cette pression crée des réactions importantes sur le bâti qui doit présenter une grande rigidité de telle façon que les déformations soient absolument négligeables par rapport à la précision d'usinage exigée. Le (ou les) porte-électrode(s) peut être orienté horizontalement ou verticalement. Sauf pour des travaux particuliers exigeant la position horizontale, il est habituellement plus intéressant de disposer d'une machine verticale.

Les bâts doivent être soigneusement protégés de la corrosion par l'emploi de revêtements appropriés (peintures spéciales, élastomère, etc.) et par des systèmes d'étanchéité évitant toute infiltration de liquide à l'intérieur des caissons recevant les différents mécanismes. L'enceinte de travail est munie d'une aspiration des vapeurs, principalement pour extraire l'hydrogène produit par l'électrolyse ; en outre, elle est équipée à des endroits facilement accessibles des éléments de raccordements aux différents fluides (électrolyte, intensité de courant, air comprimé) et dispositifs de contrôle (court-circuit, pression/débit de l'électrolyte, passivation des cathodes, etc.).

5.2 Générateur

Le courant électrique d'usinage est fourni par un générateur piloté à tension continue (exceptionnellement à courant continu) réglable en continu de 7 à 25 V et maintenu parfaitement stable à $\pm 1\%$ par rapport à la valeur de consigne. La gamme des générateurs présentés par les constructeurs s'échelonne de 500 à 40 000 A. Des générateurs à tension pulsée sont actuellement proposés par les constructeurs pour diminuer l'élévation de température de l'électrolyte et augmenter la surface usinée mais la vitesse est réduite.

Au générateur sont aussi incorporées les surveillances électroniques (généralement brevetées) du processus, telles que :

- une détection de court-circuit dans et en dehors du gap, d'arc, de passivation, de turbulence ;
- des dispositifs d'extinction d'arc, de court-circuit pour éviter, voire supprimer, l'établissement de ces incidents.

5.3 Dispositif de pilotage de la machine

La vitesse d'avance de la cathode régit le gap qui intervient de façon prépondérante sur la reproductibilité et la précision d'usinage ; sa valeur doit être modulée en fonction de la nature des matériaux, la composition de l'électrolyte, la tension utilisée ou le type d'usinage. Le système d'entraînement du porte-cathode doit donc présenter une vaste plage de variation de vitesse (0,1 à 40 mm/min) avec une force d'avance de 5×10^3 à 250×10^3 N suivant le type de machine, donc fonctionner dans une large gamme de puissance du générateur. La stabilité de la vitesse d'usinage doit être inférieure à 1 % quelles que soient les variations de charge résultant des modifications de pression d'électrolyte ou de la surface de poussée (surface d'usinage).

Une machine d'ECM doit être considérée comme un centre d'usinage, avec un pilotage par commande numérique. Cette dernière doit assurer le cycle d'usinage suivant :

- mise en position des cathodes à grande vitesse, avec la surveillance de la collision éventuelle des électrodes ;

- mise en circulation de l'électrolyte, avec le contrôle au minimum de sa température et de son pH ;
- mise sous tension du générateur à la valeur programmée ;
- enclenchement immédiat de l'avance de la cathode à la vitesse programmée, avec un arrêt précis en fin d'usinage ou lors d'incident d'usinage ;
- arrêt de l'avance de la cathode ;
- arrêt du générateur ;
- retour en position de départ de la cathode ;
- arrêt de la circulation de l'électrolyte.

En outre, la commande numérique permet de piloter avec précision tous les paramètres de l'usinage (pH, conductivité, température de l'électrolyte, avance de la (ou des) tête porte-cathode(s), débit et/ou pression, etc.) tout au long du cycle d'usinage.

5.4 Circuit de l'électrolyte

Séparé ou incorporé à la machine, il est constitué d'une unité de circulation de l'électrolyte et d'une unité de filtration de l'électrolyte pour son épuration des résidus de la dissolution.

Unité de circulation

Nous avons vu (§ 1.4) que le procédé nécessite un film homogène entre les zones actives des électrodes. L'électrolyte doit circuler à grande vitesse, ce qui implique un grand débit sous haute pression. Ce débit est variable selon les dimensions de l'empreinte à réaliser. Généralement, le débit est compris entre 250 L/min (installation de 3 000 A) et 1 500 L/min (installation de 20 000 A) sous des pressions de 10 à 25 bar. La capacité du bac d'électrolyte varie de 2 à 10 m³ selon les besoins.

Nous avons montré (§ 1.6) que la température de l'électrolyte doit être maintenue constante, ce qui impose une régulation à $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour cela, nous avons, d'une part, des éléments chauffants pour amener l'électrolyte en début de travail à la température requise (30 à 40 °C) et, d'autre part, des échangeurs de chaleur pour évacuer les calories produites par l'ECM (effet Joule, pompe de circulation, etc.).

Unité de filtration

Une opération de clarification de l'électrolyte est nécessaire pour éviter que des corps solides, de dimensions supérieures au gap/2 et introduits accidentellement, ainsi que les différents constituants de l'alliage dissous et évacués sous forme d'hydroxydes nuisent à l'usinage. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour éliminer ces particules, mais il faut noter qu'une légère présence d'hydroxydes dans l'électrolyte est nécessaire pour stabiliser sa conductivité.

Plusieurs méthodes peuvent être employées :

— *décantation* : les hydroxydes ayant une masse voisine de celle de l'électrolyte, elle s'effectue de façon très lente, ce qui implique un volume d'électrolyte très important ;

— *centrifugation* : cette méthode est beaucoup plus rapide mais nécessite une centrifugeuse et sa pompe d'alimentation ;

— *filtration* : le passage de l'électrolyte à travers un filtre-presse donne de très bons résultats, mais reste limité en débit ; c'est généralement réservé aux installations de faibles puissances et pour des applications nécessitant de faibles gap. Pour les électrolytes acides, utilisés en perçage de grande profondeur, seule la filtration est utilisable. L'élimination des métaux dissous doit se faire par le remplacement partiel de l'électrolyte usagé par une même quantité d'électrolyte neuf.

Il est évident que ces méthodes ne suppriment pas complètement les résidus, mais une faible proportion d'hydroxydes ne gêne en rien l'usinage à condition qu'ils soient de taille inférieure au gap/2.

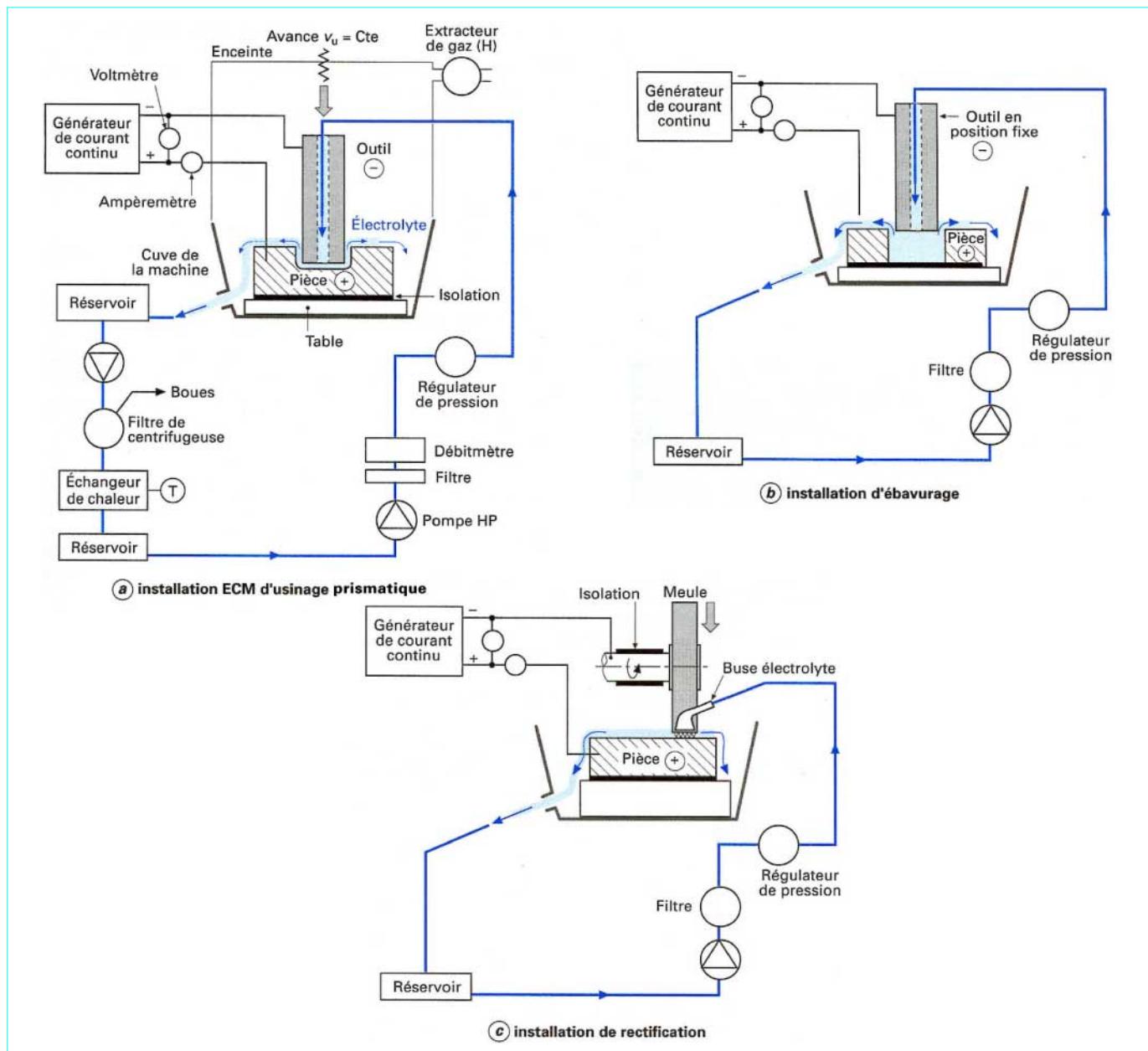


Figure 18 – Constitution de machines ECM

6. Avantages et inconvénients

Les principaux avantages de l'ECM sont :

— l'usinage de tout matériau conducteur (acières ordinaires et inoxydables, alliages réfractaires à base de nickel ou cobalt, alliages à base de titane, matériaux frittés, etc.), quel que soit leur état de traitement métallurgique ;

— un usinage surfacique avec une vitesse de pénétration importante tout en permettant l'obtention d'un état de surface de finition sans perturbations métallurgiques ;

- l'absence d'opération d'ébauche ;
- la reproduction de formes complexes ;
- le perçage avec des rapports profondeur/diamètre très importants (< 200) ;
- l'usinage de parois minces par usinage simultané des deux côtés de la pièce, par exemple pour les aubes de turbomachines ;
- l'absence d'usure de l'outil ;
- un contrôle aisément des paramètres de l'usinage permettant une grande reproductibilité.

Mais nous ne pouvons pas oublier les inconvénients relatifs :

- aux problèmes de corrosion ;
- aux difficultés inhérentes à l'électrolyte ;

- à l'existence de pressions hydrauliques élevées (inférieures à 25 bar) ;
- aux études et à la mise au point de(s) l'outil(s).

Le tableau 2 compare l'ECM avec les autres procédés d'usinage global voisins.

De nombreuses applications existent dans l'industrie. Les différentes illustrations (figures 19 et 20) donnent quelques exemples.

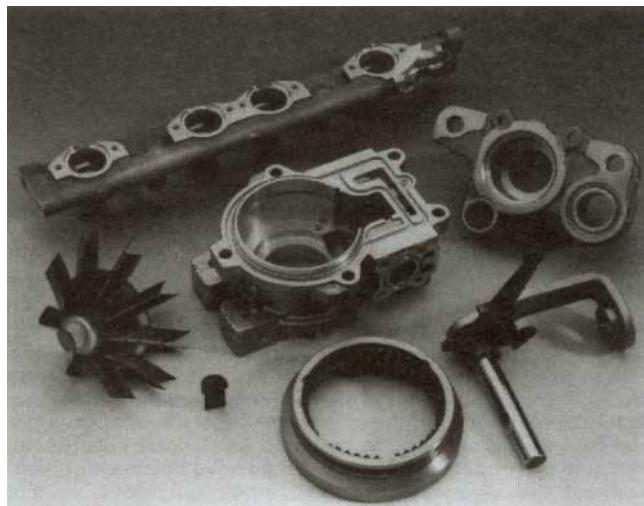


Figure 19 – Exemples de pièces ébavurées par ECM (doc. Dubuis)



Figure 20 – Exemples de pièces usinées par ECM (doc. AEG-Elotherm)

Tableau 2 – Comparaison de l'ECM par rapport à d'autres procédés d'usinage

Caractéristiques	ECM	Électro-érosion EDM	Enlèvement mécanique de matière	Usinage chimique UC	Usinage ultrasons US
Matériaux :					
métallique conducteur électrique	oui	oui	oui	oui	difficile
composite non conducteur électrique	non	non	oui	non	non
céramique non conducteur électrique....	non	non	oui	non	oui
taux d'usinabilité	sans influence	sans influence	très influent	sans influence	influent
Usinage :					
surface gauche.....	surfacique	surfacique	linéaire	surfacique	surfacique/linéaire
ébavurage peu accessible.....	oui	non	non	non	non
contourage/trépanage.....	oui	oui	oui	non	oui
perçage { cylindrique	oui	oui	oui	oui	oui
de forme	oui	oui	non	oui	oui
rapport profondeur/diamètre.....	200	10 à 20	10 à 20	2	5 à 10
diamètre minimal.....	0,15	0,05	suivant matériaux	(2)	0,5
tournage	oui	oui	oui	non	non
cycle : ébauche + finition	non	oui	oui	non	non/oui (3)
Outil :					
spécifique	oui	oui	non	masque	oui (3)
consommable	non	oui	oui	oui	oui
Contrainte de surface	sans	(1)	compression	sans	peu de compression
État de surface R_a (μm)	0,6	< 0,6	< 0,6	0,8	< 0,6
Influence du R_a sur le temps d'usinage	sans	très importante	importante	sans	peu
(1) ZAT : zone affectée thermiquement.					
(2) suivant applications et techniques de masquage.					
(3) suivant la technologie d'usinage.					

7. Bilan économique

Avec l'ECM, le temps d'opération est directement fonction de la profondeur de pénétration de la cathode car l'usinage se fait simultanément sur toute la surface et une ébauche préalable n'est pas nécessaire. Pour obtenir une bonne reproductibilité dimensionnelle et d'état de surface, il faut des profondeurs d'usinage suffisantes pour effacer l'effet mémoire des défauts initiaux (figure 21).

Pour établir un bilan économique, on doit prendre en compte les paramètres suivants :

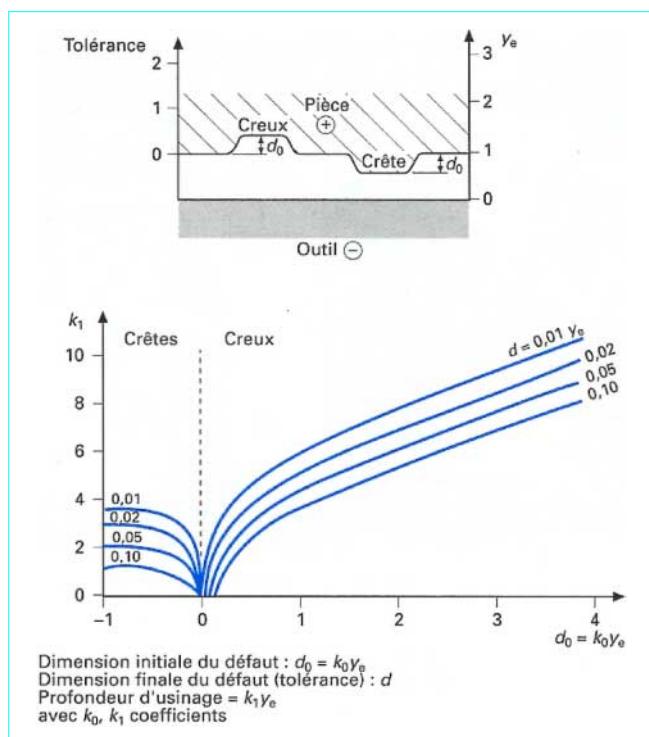
- le taux d'usinabilité du matériau suivant son état métallurgique : ce paramètre n'intervient pas sur les temps d'usinage ECM, mais celui-ci est très important pour tous les autres procédés d'enlèvement de métal (sauf EDM) ;

- l'état de surface ;
- les dimensions de la pièce ;
- la production à réaliser (quantité totale, cadence par jour, etc.) ;
- l'outilage spécifique à la pièce ;
- l'investissement ou l'amortissement de l'installation

(figures 22 et 23).

La comparaison entre les divers modes d'usinage est très difficile et les critères de choix sont souvent fonction de la maîtrise d'un procédé. Pour cela, illustrons celle-ci par la différence entre les modes d'usinage globaux (ECM, EDM, usinage chimique, etc.) et linéaire (fraisage, tournage, etc.) pour l'usinage d'une surface gauche de $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ avec un état de surface de $R_a < 0,8 \mu\text{m}$ et l'enlèvement d'une épaisseur de 6 mm en moyenne dans un matériau de taux d'usinabilité moyen (par exemple, l'acier inoxydable).

Le temps d'usinage ECM avec une vitesse de pénétration de 4 mm/min est de $6/4 = 1,5 \text{ min}$.



Si l'on prend une fraise de type sphérique de 10 mm de rayon, avec 5 dents et une avance de 0,05 mm par dent, ce qui implique un pas de balayage en finition de 0,18 mm maximum, et deux passes d'ébauche avec des pas de 1,8 mm, la longueur à parcourir est de :

$$(200 \times 2/1,8 + 200/0,18) \times 100 = 1\,133\,000 \text{ mm}$$

Si l'on prend un temps d'usinage de 1,5 min (temps ECM), on obtient une vitesse d'avance de l'axe de fraise de $755,3 \text{ m/min}$, donc une vitesse de rotation d'environ $3 \times 10^6 \text{ tr/min}$, ce qui n'est pas envisageable dans l'état actuel des connaissances du fraisage grande vitesse. Cet exemple, bien que théorique, démontre les possibilités de l'ECM.

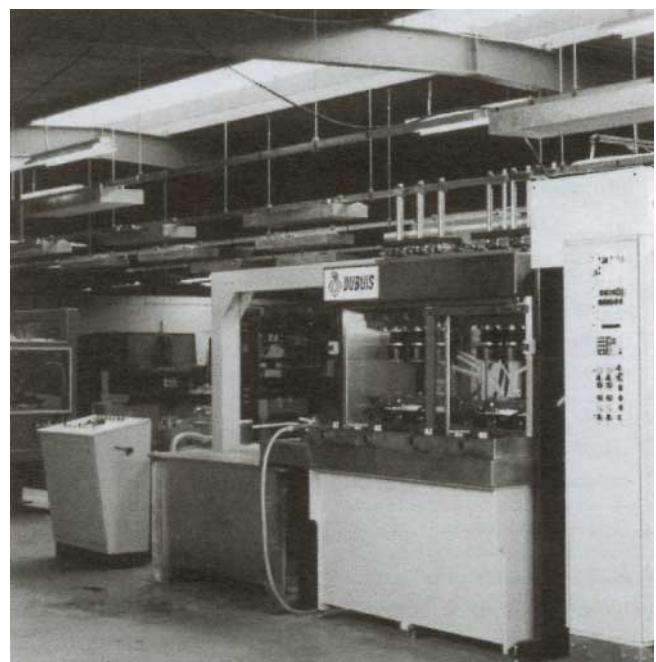


Figure 22 - Installation d'ébavurage (doc. Dubuis)

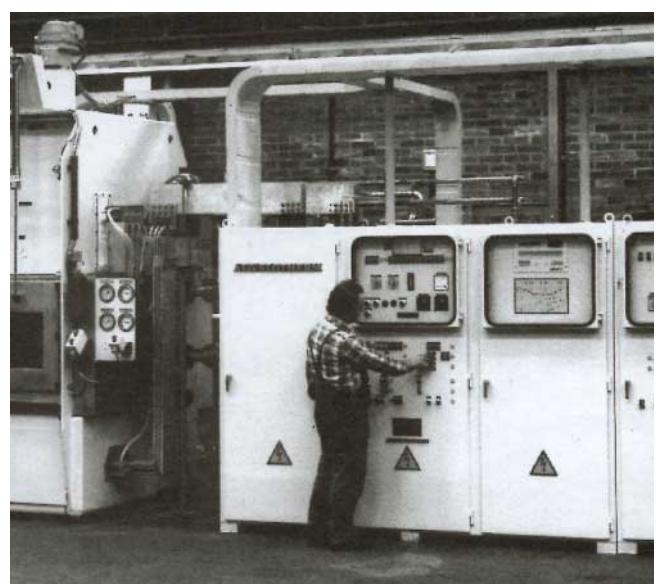


Figure 23 - Installation d'usinage (doc. AEG-Elotherm)

Usinage électrochimique

par **Pierre LECHERVY**

Ancien responsable des Usinages non conventionnels à la SNECMA

Références bibliographiques

- [1] DE BARR (A.E.) et OLIVER (D.A.). – *Electrochemical machining* (L'usinage électrochimique, traduction de J. Deibles, 1971, éd. Eyrolles). Éd. MacDonald (1968).
- [2] WILSON (J.F.). – *Practice and theory of electrochemical machining*. Wiley Interscience, a division of J. Wiley and Sons. Inc. New York.
- [3] MARTY (C.). – *Usinages par procédés non conventionnels* (réunion de textes) INSA Lyon, éd. Masson (1971).
- [4] WELLER (E.J.). – *Nontraditional machining processes*. Published by Society of Manufacturing Engineers, 2^e éd (1984).
- [5] SCHEPAEZ (C.). – *Contribution à l'étude des phénomènes de base de l'ECM en corrélation avec des performances d'usinage*. Thèse de docteur ingénieur, Université Paris VI, oct. 1976.
- [6] Guide des usinages par EDM et ECM. CETIM. NIACH (URSS). Éd. Lavoisier.
- [7] *Annales des présentations à la CIRP*. International Symposium for electromachining (ISEM), Symposium 1 à 9.
- [8] ADAM (P.). – *Stand und Aussichten der Elektrochemischen Bearbeitungsverfahren in der Fertigung von Flugtriebwerken*. Presence and future of electrochemical processes in aero engine production. MTU Focus 1/1993.
- [9] Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren.

Constructeurs

(Liste non exhaustive)

AEG-Elotherm GmbH (représenté en France par CEPID)
Amchen-Transtec Ltd (représenté en France par Omnitechnique)
Dubuis
Lehr Precision Inc.