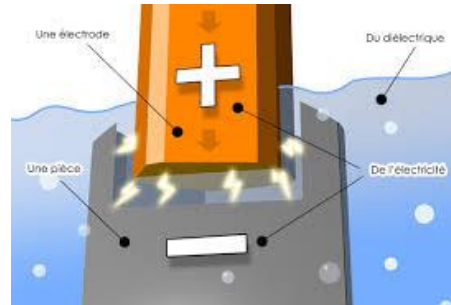


## Arts et Métiers - 2<sup>ème</sup> année



# UEI Concevoir - Usinage formes complexes Procédés non conventionnels



# Procédés d'usinage non conventionnels <sup>2 / 21</sup>

## Définition

En référence à l'usinage par outil coupant, les procédés non-conventionnels permettent d'usiner sans utiliser d'outil coupant. L'« outil » ne touche pas la pièce à usiner.

## Famille de procédés

### Procédés de découpe

- Découpe Laser
- Découpe jet d'eau haute pression
- Découpe plasma
- ...

### Procédés par enlèvement de matière (forme 3D)

- Chimique
- Électrochimique
- Ultrason
- Électroérosion



# Usinage Chimique

## Principe

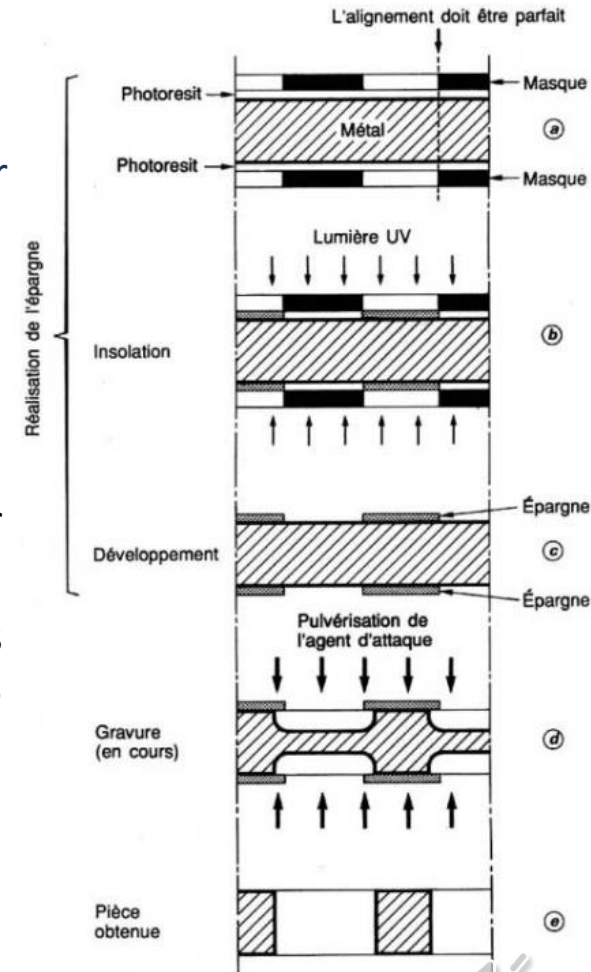
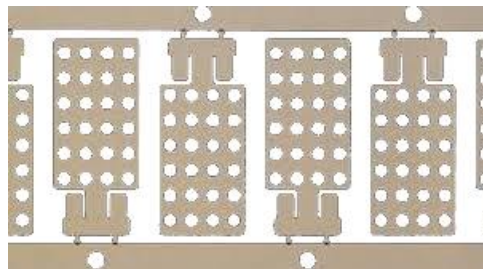
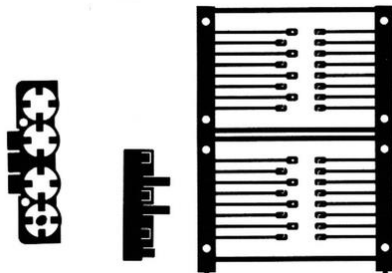
L'usinage chimique est un procédé par attaque chimique ou dissolution chimique, généralement utilisé pour un usinage localisé.

Le procédé se ramène alors à deux opérations :

- dépôt d'un masque (épargne) protecteur pour délimiter les zones ;
- attaque chimique des parties non protégées.

Il existe deux types d'usinage chimique :

- la découpe chimique, enlevant localement le métal sur toute l'épaisseur de la pièce ; utilisée en électronique et en mécanique ; ce procédé est utilisé pour obtenir des pièces plates de dimensions variées (de 1 mm<sup>2</sup> à 1 m<sup>2</sup>) à partir de feuilles ou de plaques de faibles épaisseurs (10 µm à 3 mm)



# Usinage Chimique

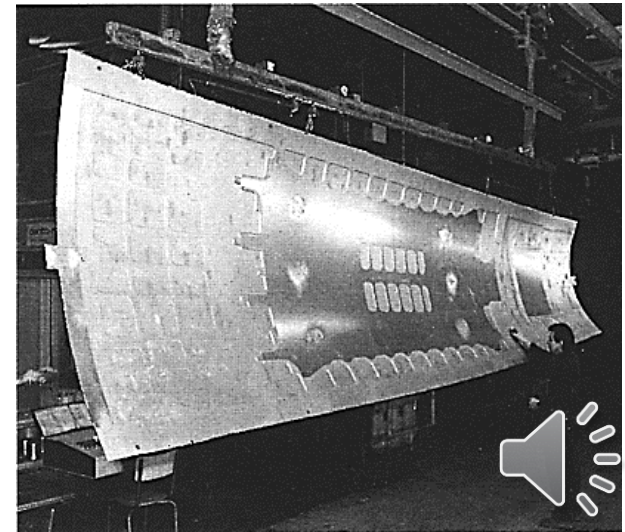
- Le fraisage chimique, pour l'amincissement des surfaces; les applications sont dans l'imprimerie (héliogravure) et surtout dans **l'usinage de grandes pièces aéronautiques** : éléments de voilures ou de fuselage (plusieurs mètres carrés), dans un but d'allègement des structures.



Le fraisage chimique est particulièrement adapté sur des alliages de titane et d'aluminium et sur l'usinage de pièces de formes complexes.

| Matériaux                          | TA6V              |
|------------------------------------|-------------------|
| <b>Composition</b>                 |                   |
| Acide fluorhydrique à 40 % .....   | 2 à 4 % en vol.   |
| Acide nitrique ( $d = 1,33$ )..... | 13 à 14 % en vol. |
| Tensioactif.....                   | oui               |
| Titane dissous.....                | 10 à 70 g/L       |
| <b>Conditions opératoires</b>      |                   |
| Température .....                  | 40 °C             |
| <b>Propriétés</b>                  |                   |
| Vitesse d'attaque.....             | 0,8 à 1,4 mm/h    |
| Rugosité $Ra$ .....                | 0,2 à 0,4 $\mu m$ |

- **Pas de modification des propriétés mécaniques** de la pièce.
- **Facilité d'usinage de pièces très minces**, de formes complexes, sans déformation.
- La **qualité de surface** obtenue ne nécessite pas de finition ultérieure



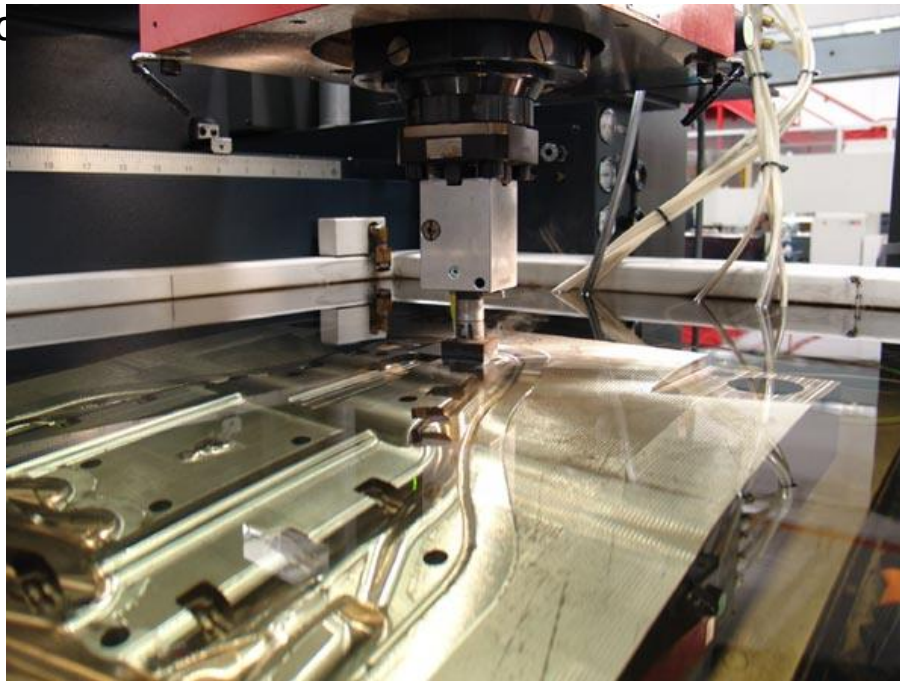
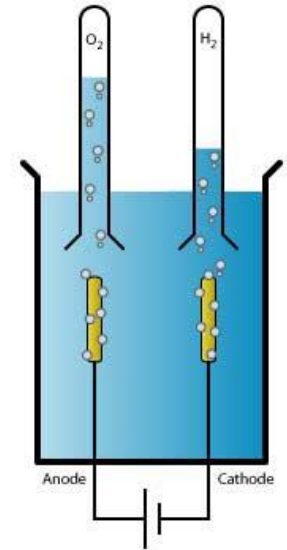
# Usinage électrochimique

## Principe

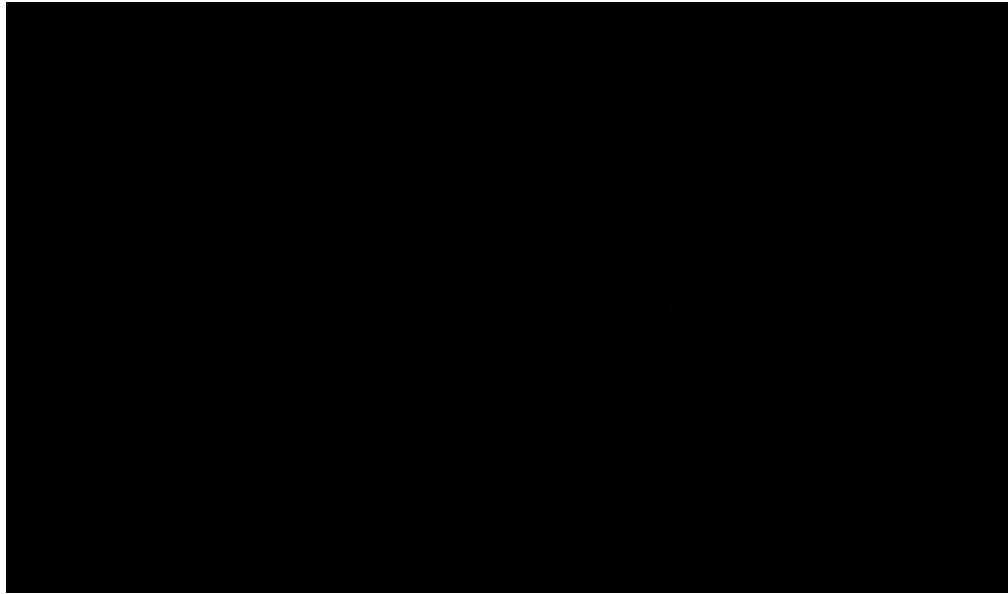
Une électrolyse provoque une dissolution ionique de l'anode selon la forme de la cathode, et ce sans que les deux éléments ne se touchent à aucun moment.

**L'usinage électrochimique** est réalisé en créant une électrolyse en utilisant la **pièce à usiner en métal chargée positivement (anode)**, et un **outil (électrode) chargé négativement (cathode)**.

L'association des charges électriques réalisées à quelques microsecondes d'intervalle va permettre de fabriquer une pièce plus ou moins complexe. Les déchets issus de l'usinage électrochimique sont emportés par le courant de l'électrolyte.



# Usinage électrochimique



## Les avantages de l'usinage électrochimique

- **Usinage de matériaux très durs**
- **Pièces de formes très complexes**
- **Très bon rapport** précision-rugosité-productivité
  - . Vitesse d'usinage de 0,1 à 3 mm/min
  - . Précision de quelques 1/100<sup>ème</sup>
  - . Intégrité de surface : Ra 0,03µm (poli miroir), pas d'écrouissage ni de dégradation thermique
- **Absence d'usure de l'outil**

**mais investissement initial important.**

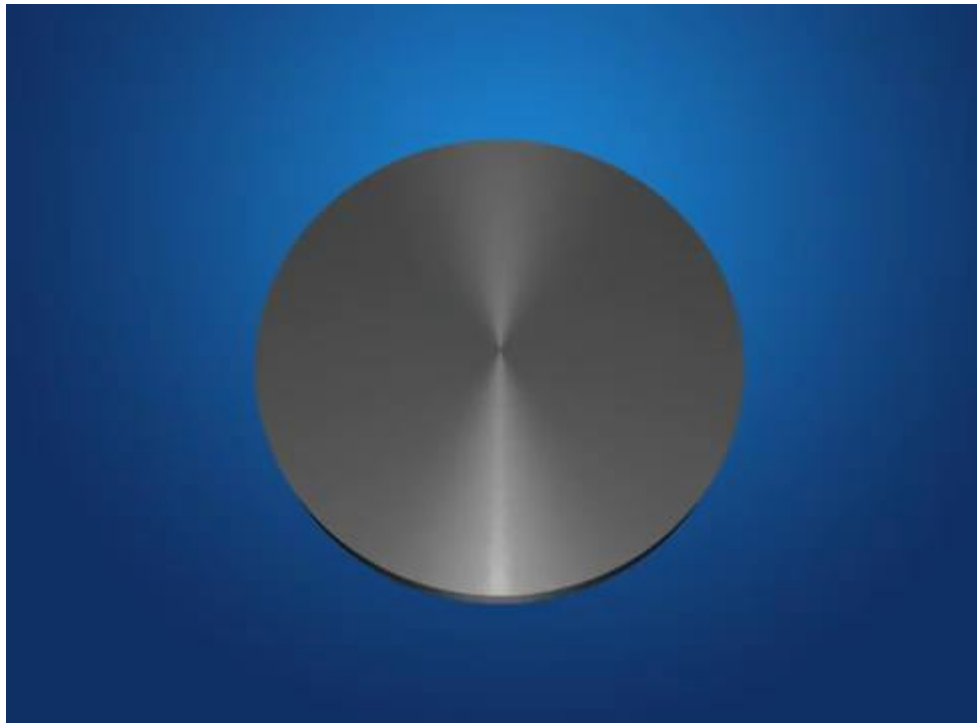


# Usinage par Ultrason

## Principe

L'enlèvement de matière se fait par abrasion avec un outil vibrant. L'outil de la forme à usiner descend dans la pièce.

Dans le **procédé d'usinage par ultrason**, un jet d'abrasif est rependu en permanence sur la pièce à l'aide d'une buse. Un outil placé en bout d'une sonotrode descendant en vibrant à une fréquence d'environ 30 kHz.



### Les avantages de l'usinage par ultrason

- Usinage de matériaux :
  - . non conducteurs
  - . très durs
- Pièces de formes très complexes

### Mais

- Mauvaise productivité
- Usure de l'outil



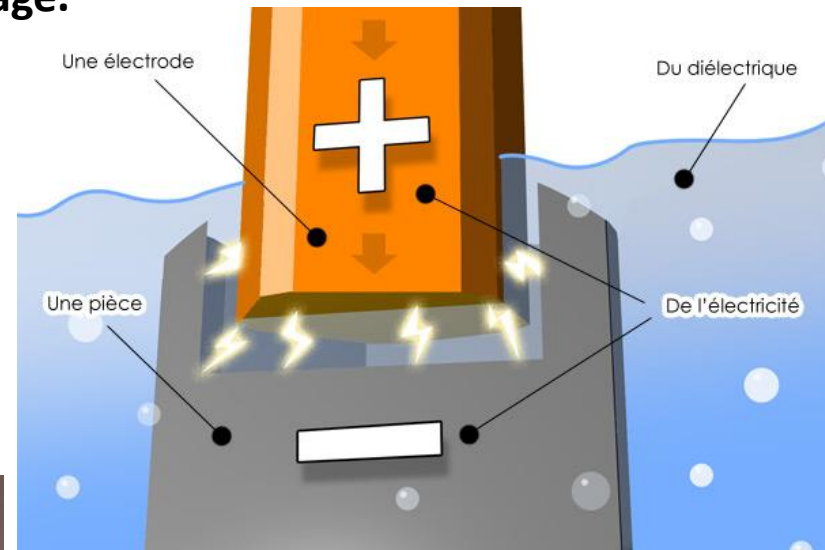
# Usinage par Électroérosion

## Principe

L'**électroérosion** (EDM, *electrical discharge machining*) utilise des décharges électriques pour usiner la pièce, on parle aussi d'**usinage par étincelage**.

**Électrode en cuivre, en graphite ou autres**  
(molybdène, tungstène...)

**Fluide diélectrique** : hydrocarbure, huiles minérales, produits de synthèse...



Vitesses d'usinage entre 0,2 et 10 mm/min, mais la précision en dépend.

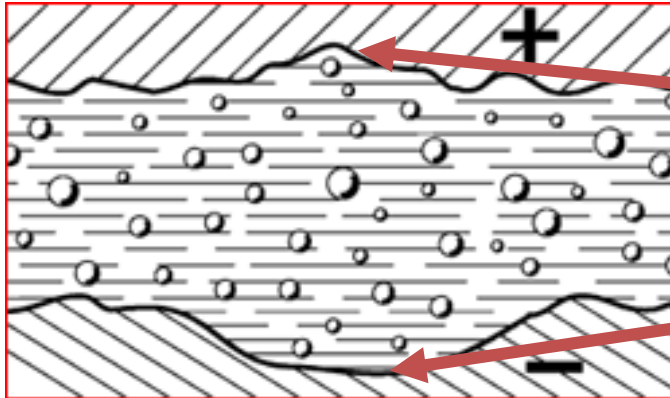
Précision de l'ordre de 5  $\mu\text{m}$  (plus précis que l'électrochimie).

État de surface :  $Ra_{\min} = 0,4 \mu\text{m}$

Réservé pour les pièces conductrices

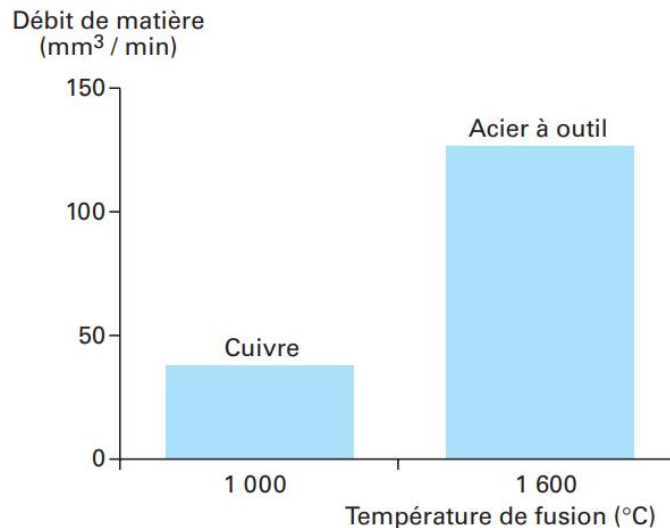


# Usinage par Électroérosion



petit cratère sur outil  
( outil frappé par électrons )

grand cratère sur pièce  
( pièce frappée par cations )



**Ébauche:** grandes intensités  
grands cratères (1/100<sup>ème</sup>)

**Finition:** petites intensités  
petits cratères (1 µm)

**Conditions expérimentales :**

Décharge { 16 A  
50 µs

Pièce : polarité négative



# Usinage par Électroérosion

## Intégrité de surface

L'enlèvement de matière est provoqué principalement par un phénomène thermique, par fusion et vaporisation du métal. Une partie seulement du métal fondu par chaque décharge est arrachée du cratère, le reste solidifiant sur place, ce qui provoque une altération de la surface.

Une analyse métallographique sur une coupe d'une surface électroérodée d'un acier montre qu'il existe une couche thermiquement affectée, que l'on sépare habituellement en trois sous-couches :

- la couche blanche
- la couche trempée
- la couche de transition ou couche revenue

L'épaisseur totale est de quelques microns (finition) à quelques  $1/10^{\text{ème}}$  en ébauche.

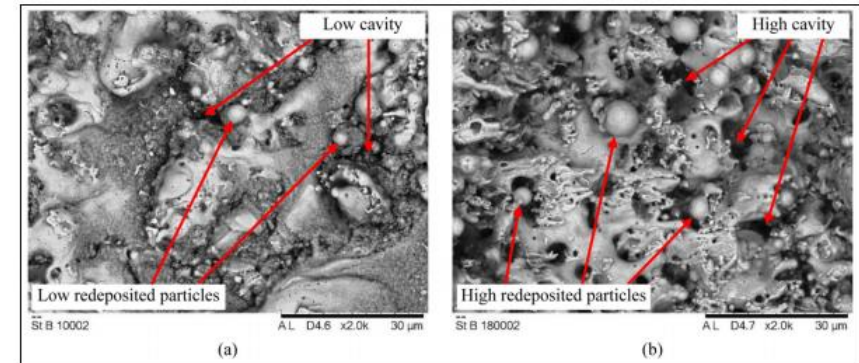


Figure 2.18 Agrandissements d'échantillons obtenus à l'aide d'un MEB. En a) : faible courant et faible temps de travail, en b) haut courant et haut temps de travail. Tiré de (Maher et al., 2015)

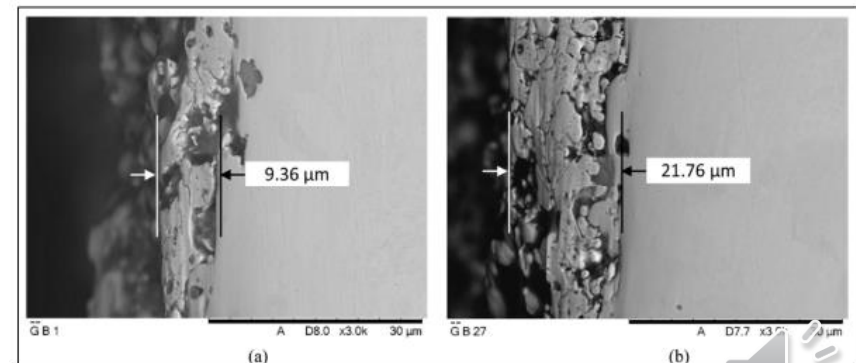
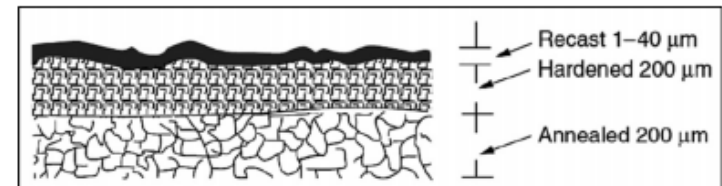
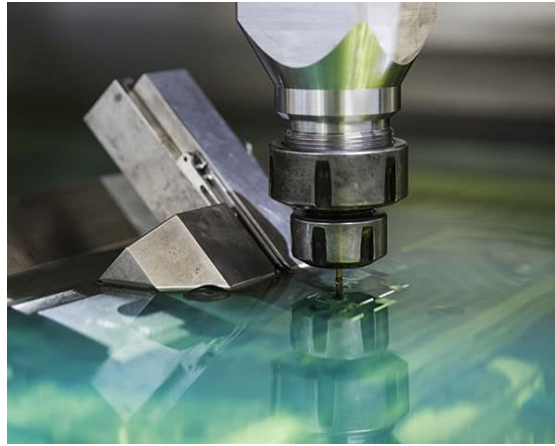


Figure 3.10 Impact de la quantité d'énergie dégagée par un arc électrique sur l'épaisseur de la couche resolidifiée. En a) faible courant et faible temps de travail. En b) haut courant et haut temps de travail. Tiré de (Maher et al., 2015)

# Usinage par Électroérosion

## Différentes configurations de machine

### Enfonçage



### Par immersion

### Fil



### Par aspersion

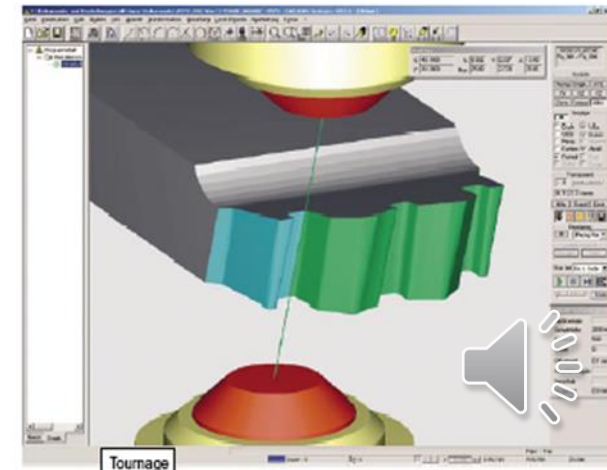
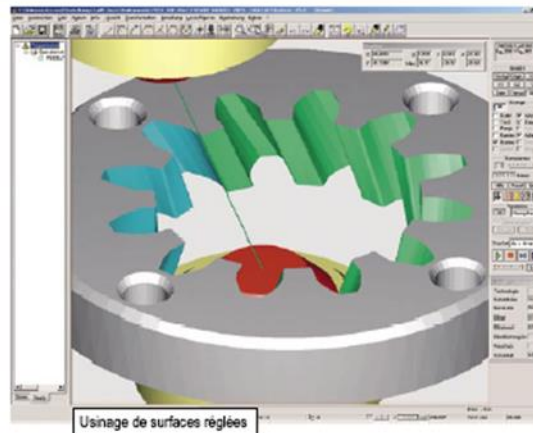
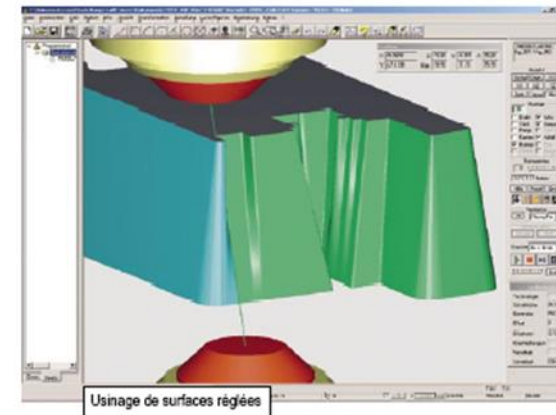
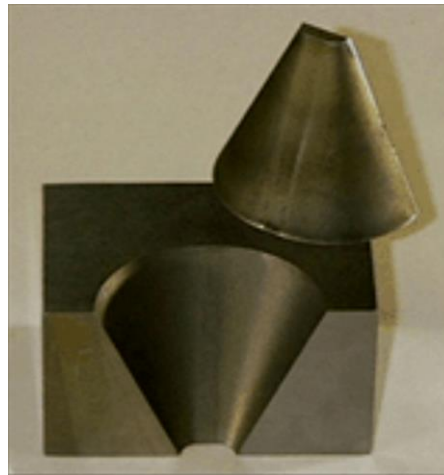


# Usinage par Électroérosion

## Électroérosion par fil

Hauteur de découpe entre 50 à 150 mm.

Vitesse de découpe de l'ordre de 200 à 400 mm<sup>2</sup>/min. Ex : 3mm/min pour une pièce de 100 mm.  
(vitesse de déroulement du fil de l'ordre de 10 à 20 m/min)



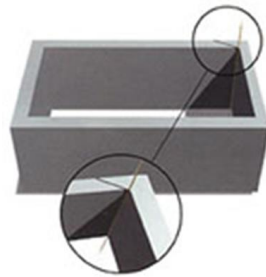
# Usinage par Électroérosion

## Comparaison avec le fraisage

### Électroérosion

Débit d'usinage de l'ordre du  $\text{cm}^3/\text{min}$

Angles vifs possibles



Usinage matériaux très durs sans aucun effort sur la pièce



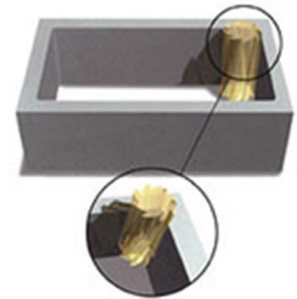
Perçage profond de petit diamètre



### Fraisage

Débit d'usinage de plusieurs  $\text{dm}^3/\text{min}$

Tous matériaux possibles

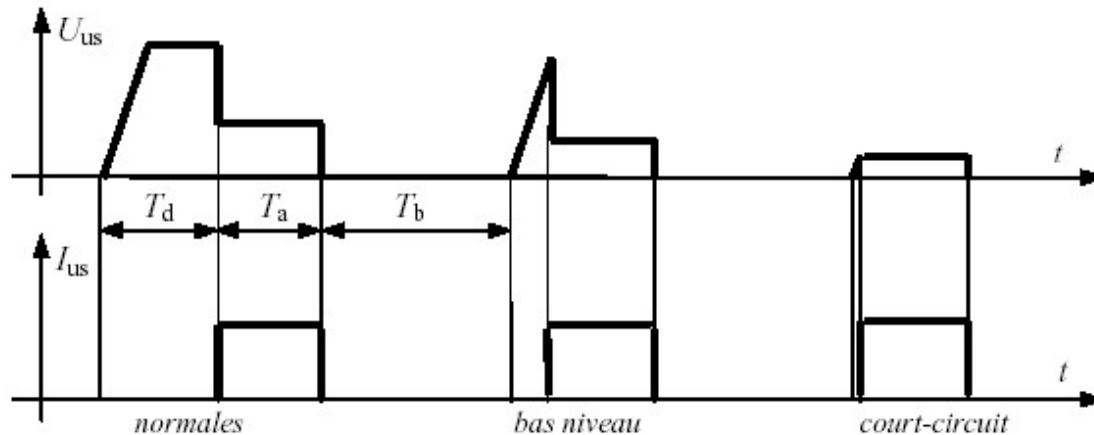


# Usinage par Électroérosion

## Réglage machine - Application

Pour réaliser une pièce, il faut régler :

- **le temps de l'impulsion** ( $T_a$ ) : Phase A
- **le temps entre deux cycles** ( $T_b$ ) : Phase B
- **l'intensité** : de qq A ou qq centaines d'Ampère (tension entre 80 et 200 V)  
électrode en cuivre : intensité de 15 A/cm<sup>2</sup> maxi



Les réglages se font en fonction :

- de **l'état de surface souhaité** (CH) :  $CH = 20 \log (10.Ra)$   
expl :  $Ra = 1 \mu m \Rightarrow CH = 20$
- de **l'usure admissible pour l'électrode** :  
Ébauche : usure max < 2%  
Finition : usure < 5% après une opération d'ébauche  
usure < 2% si pas de passe d'ébauche



# Usinage par Électroérosion

## Réglage machine – Application

Réalisation d'un **trou carré de 16 mm de côté et de 10 mm de profondeur** dans une pièce **acier avec une électrode en cuivre**, et une **circulation du diélectrique pas injection** (et non par aspiration).

État de surface en finition **CH 27** ( $R_a = 2,2 \mu\text{m}$ ).

2 opérations : ébauche et finition

## Phase d'ébauche

### Réglage de l'intensité : I

Électrode en cuivre :  $15 \text{ A/cm}^2$

Surface,  $S = 1,6 * 1,6 = 2,56 \text{ cm}^2$

$I = 38,4 \text{ A maxi}$

*Choix des circuits de réglage de l'intensité*

|                                |                    |                                     |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| <i>Machine Charmille D10 :</i> | <i>Circuit 1/8</i> | $\Rightarrow 3,125 \text{ A}$       |
|                                | <i>Circuit 1/4</i> | $\Rightarrow 6,25 \text{ A}$        |
|                                | <i>Circuit 1/2</i> | $\Rightarrow 12,5 \text{ A}$        |
|                                | <b>Circuit 1</b>   | $\Rightarrow \mathbf{25 \text{ A}}$ |
|                                | <i>Circuit 2</i>   | $\Rightarrow 50 \text{ A}$          |
|                                | <i>Circuit 4</i>   | $\Rightarrow 100 \text{ A}$         |

**Sélection des circuits 1 + ½**

$\Rightarrow \mathbf{37,5 \text{ A}}$



# Usinage par Électroérosion

## Réglage du temps d'impulsion : $T_a$

*Le réglage de  $T_a$  se fait en sectionnant une valeur pour le paramètre A (potentiomètre)*

Si A ↗,

⇒ le temps  $T_a$  ↗

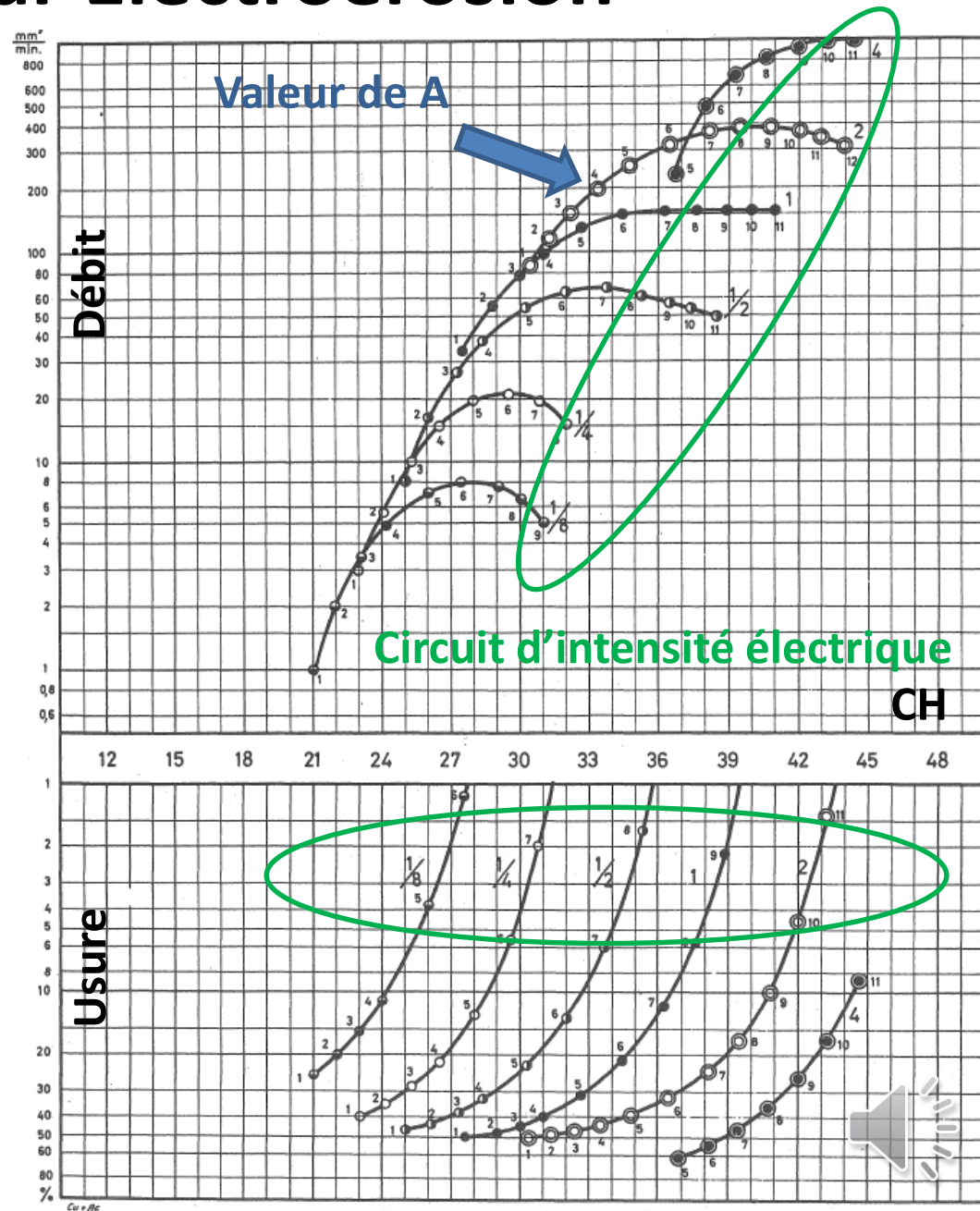
⇒ usure de l'électrode ↘

⇒ CH ↗

*A grand pour l'ébauche*

*A petit pour finition*

*Choix par Abaque*



# Usinage par Électroérosion

Réglage du temps d'impulsion :  $T_a$

Circuits sélectionnés :  $1 + \frac{1}{2}$

=> Interpolation

Ébauche

=> Usure maxi = 2%

=>  $A = 11$

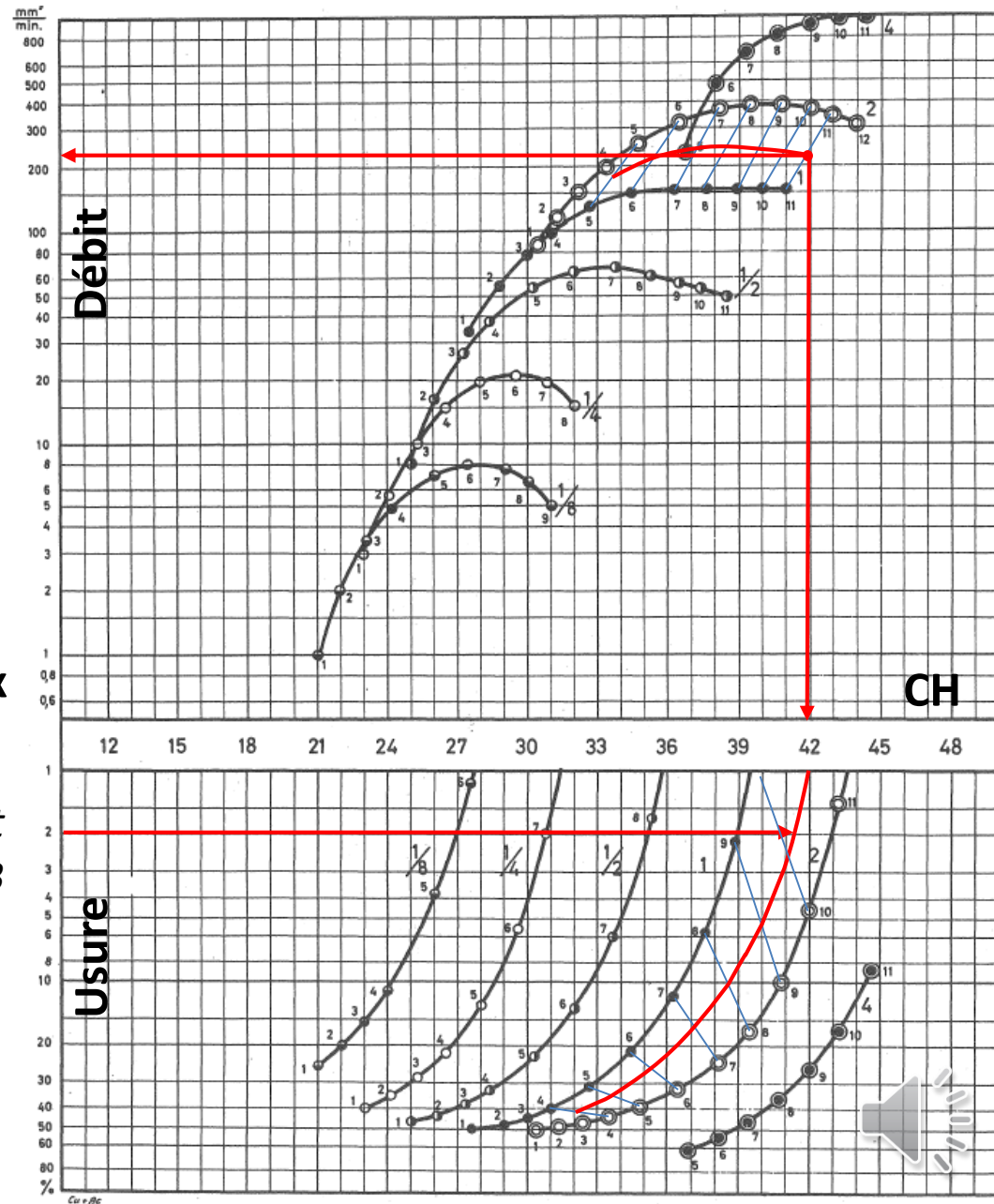
Débit de  $230 \text{ mm}^3/\text{min}$

$CH = 42$

Réglage du temps entre deux cycles :  $T_b$

Le réglage de  $T_b$  se fait en sectionnant une valeur pour le paramètre  $B$  (potentiomètre) avec  $B = A - 3$  ou  $4$

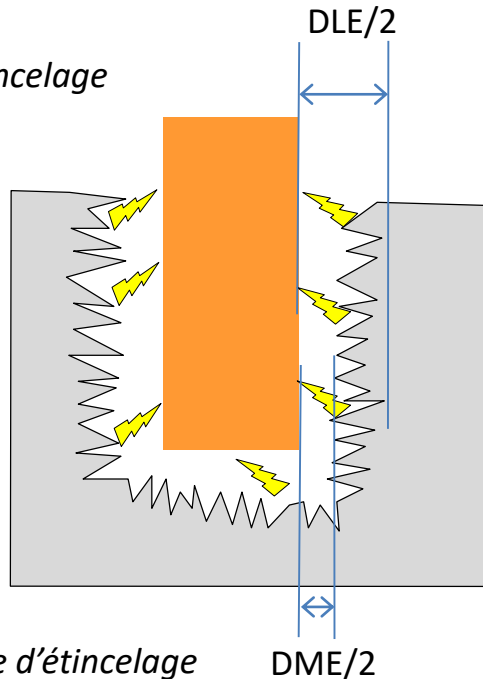
=>  $B = 7$



# Usinage par Électroérosion

## Dimension de l'électrode

*DLE : Distance limite d'étincelage*



*DME : Distance mesurable d'étincelage*

**Sécurité pour la finition fixée à DLE/4  
(surépaisseur pour finition)**

**Dimension de l'électrode = dim trou - DLE - Sécurité**  
 $= 16 - 0,595 - 0,595/2$   
 $= 15,11 \text{ mm}$

Rem : l'intensité de doit pas dépasser 15 A/cm<sup>2</sup> !

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

Circuit : 2 (50A)

| Position A | Position B | Aspiration |      | Injection |       |
|------------|------------|------------|------|-----------|-------|
|            |            | DME        | DLE  | DME       | DLE   |
| 1          | 2          | 0.09       | 0.14 | 0.115     | 0.14  |
| 2          | 2          | 0.10       | 0.16 | 0.13      | 0.16  |
| 3          | 2          | 0.11       | 0.17 | 0.14      | 0.17  |
| 4          | 2          | 0.12       | 0.19 | 0.155     | 0.19  |
| 5          | 2          | 0.145      | 0.23 | 0.19      | 0.235 |
| 6          | 3          | 0.175      | 0.28 | 0.23      | 0.29  |
| 7          | 4          | 0.210      | 0.34 | 0.28      | 0.35  |
| 8          | 4          | 0.26       | 0.42 | 0.34      | 0.43  |
| 9          | 5          | 0.31       | 0.50 | 0.42      | 0.52  |
| 10         | 6          | 0.36       | 0.56 | 0.48      | 0.61  |
| 11         | 7          | 0.41       | 0.62 | 0.54      | 0.69  |
| 12         | 8          | 0.44       | 0.67 | 0.55      | 0.72  |

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

Circuit : 1 (25A)

| Position A | Position B | Aspiration |      | Injection |       |
|------------|------------|------------|------|-----------|-------|
|            |            | DME        | DLE  | DME       | DLE   |
| 1          | 1          | 0.077      | 0.11 | 0.092     | 0.112 |
| 2          | 1          |            |      |           |       |
| 3          | 2          |            |      |           |       |
| 4          | 2          |            |      |           |       |
| 5          | 2          |            |      |           |       |
| 6          | 3          | 0.14       | 0.21 | 0.178     | 0.23  |
| 7          | 3          | 0.17       | 0.25 | 0.21      | 0.27  |
| 8          | 4          | 0.20       | 0.30 | 0.255     | 0.33  |
| 9          | 5          | 0.25       | 0.36 | 0.31      | 0.40  |
| 10         | 6          | 0.28       | 0.42 | 0.36      | 0.46  |
| 11         | 7          | 0.32       | 0.48 | 0.4       | 0.50  |

**DME = 0,47**      **DLE = 0,595**

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

Circuit : 1/2 (12.5A)

| Position A | Position B | Aspiration |       | Injection |       |
|------------|------------|------------|-------|-----------|-------|
|            |            | DME        | DLE   | DME       | DLE   |
| 1          | 1          | 0.058      | 0.085 | 0.075     | 0.090 |
| 2          | 1          | 0.064      | 0.094 | 0.082     | 0.10  |
| 3          | 1          | 0.070      | 0.10  | 0.088     | 0.11  |
| 4          | 2          | 0.076      | 0.112 | 0.095     | 0.12  |
| 5          | 2          | 0.091      | 0.135 | 0.112     | 0.145 |
| 6          | 3          | 0.11       | 0.160 | 0.135     | 0.172 |
| 7          | 3          | 0.13       | 0.19  | 0.16      | 0.21  |
| 8          | 4          | 0.155      | 0.23  | 0.19      | 0.25  |
| 9          | 5          | 0.18       | 0.27  | 0.22      | 0.29  |
| 10         | 6          | 0.20       | 0.30  | 0.25      | 0.32  |

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

Circuit : 1/4 (6.25A)

| Position A | Position B | Aspiration |       | Injection |       |
|------------|------------|------------|-------|-----------|-------|
|            |            | DME        | DLE   | DME       | DLE   |
| 1          | 1          | 0.045      | 0.065 | 0.06      | 0.07  |
| 2          | 1          | 0.05       | 0.073 | 0.065     | 0.078 |
| 3          | 1          | 0.055      | 0.08  | 0.07      | 0.085 |
| 4          | 2          | 0.06       | 0.088 | 0.075     | 0.093 |
| 5          | 2          | 0.07       | 0.105 | 0.085     | 0.11  |
| 6          | 3          | 0.085      | 0.13  | 0.10      | 0.13  |
| 7          | 3          | 0.095      | 0.15  | 0.115     | 0.16  |
| 8          | 4          | 0.105      | 0.17  | 0.135     | 0.18  |
| 9          | 5          | 0.11       | 0.18  | 0.15      | 0.20  |

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

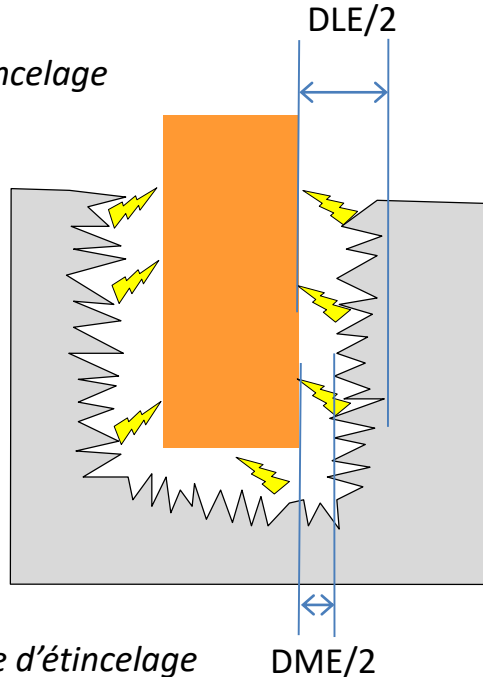
Circuit : 1/8 (3.12A)

| Position A | Position B | Aspiration |     | Injection |       |
|------------|------------|------------|-----|-----------|-------|
|            |            | DME        | DLE | DME       | DLE   |
| 1          | 2          | 0.034      |     | 0.05      | 0.07  |
| 2          | 2          | 0.037      |     | 0.052     | 0.07  |
| 3          | 2          | 0.04       |     | 0.055     | 0.08  |
| 4          | 2          | 0.044      |     | 0.058     | 0.085 |
| 5          | 2          | 0.05       |     | 0.066     | 0.1   |
| 6          | 3          | 0.056      |     | 0.075     | 0.1   |
| 7          | 4          | 0.061      |     | 0.082     | 0.13  |
| 8          | 4          | 0.065      |     | 0.087     | 0.15  |

# Usinage par Électroérosion

## Dimension de l'électrode

*DLE : Distance limite d'étincelage*



*DME : Distance mesurable d'étincelage*

**Sécurité pour la finition fixée à  $DLE/4$**   
**(surépaisseur pour finition)**

$$\begin{aligned} \text{Dimension de l'électrode} &= \text{dim trou} - DLE - 2 \times \text{Sécurité} \\ &= 16 - 0,595 - 2 \times 0,595/4 \\ &= 15,11 \text{ mm} \end{aligned}$$

Rem : l'intensité de doit pas dépasser  $15 \text{ A/cm}^2$  !

Après l'ébauche, la cote mesurable est égale à la dimension de l'électrode + DME, soit 15,58 mm.

$$\begin{aligned} \text{Descente} &= \text{profondeur} - DLE/2 - \text{Sécu} \\ &= 9,55 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Valeur mesurable} &= \text{descente} + DME / 2 \\ &= 9,785 \end{aligned}$$

Rem :

Il est possible de prendre une électrode de 15 mm et de réaliser une descente avec un mouvement d'excentration.



# Usinage par Électroérosion

## Phase de finition

CH 27

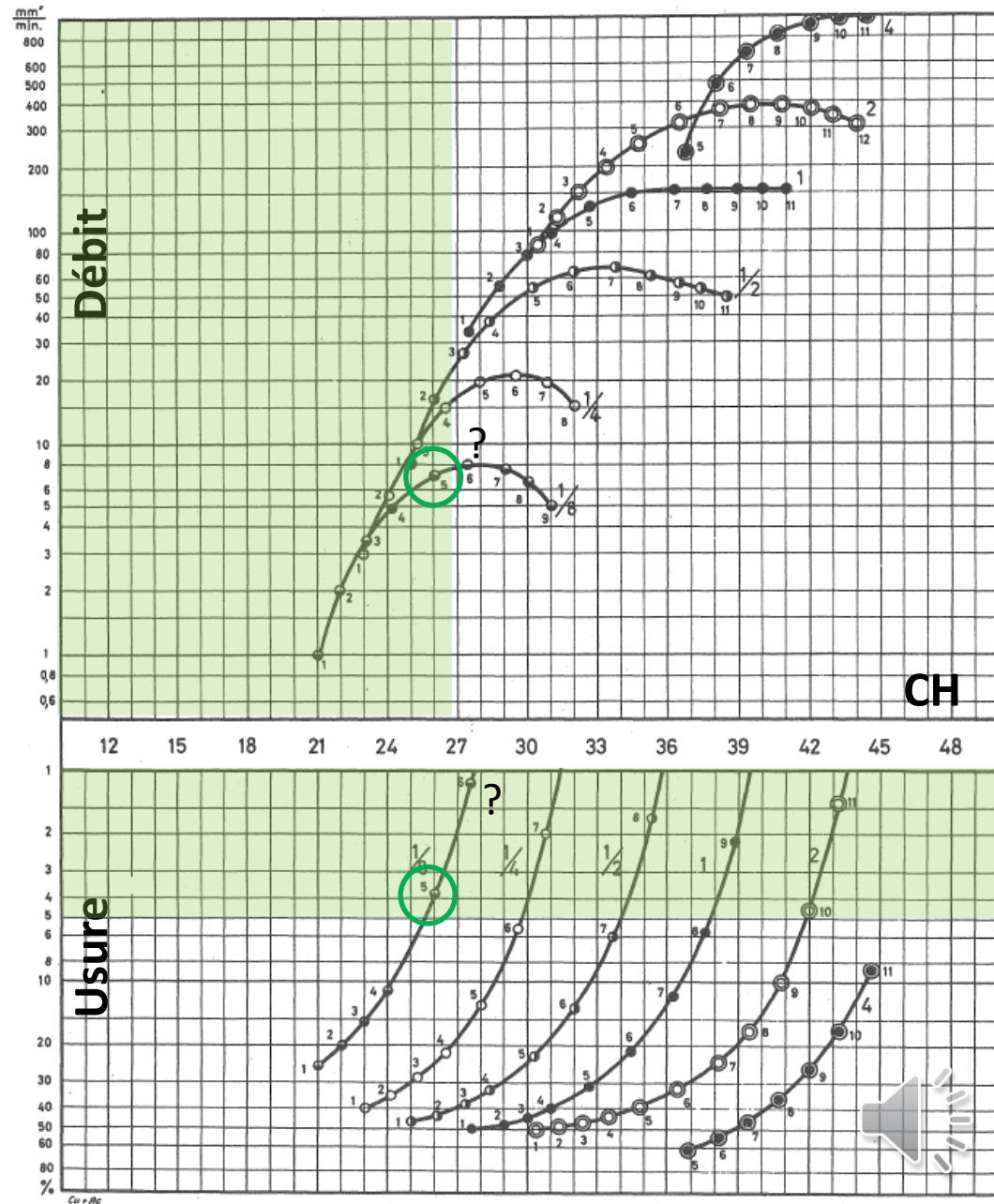
Usure < 5%

⇒ Circuit 1/8

⇒ A = 5

⇒ B = 2

⇒ Usure ≈ 4 %



# Usinage par Électroérosion

## Phase de finition

CH 27

Usure < 5%

⇒ Circuit 1/8

⇒ A = 5

⇒ B = 2

⇒ Usure ≈ 4 %

Dimension de l'électrode = dim trou – DME  
 = 16 – 0,066  
 = 15,934 mm

Rem :

Débit en finition = 7 mm<sup>3</sup>/min, ce qui est très faible !

Le plus rapide est de faire des étapes intermédiaires i.e.  
 (en moyenne de 3 CH, mieux 2 au début et 4 vers la fin)  
 => CH42, CH40, CH38, CH35, CH31, CH27

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

Circuit : 2 (50A)

| Position<br>A | Position<br>B | Aspiration |      | Injection |       |
|---------------|---------------|------------|------|-----------|-------|
|               |               | DME        | DLE  | DME       | DLE   |
| 1             | 2             | 0.09       | 0.14 | 0.115     | 0.14  |
| 2             | 2             | 0.10       | 0.16 | 0.13      | 0.16  |
| 3             | 2             | 0.11       | 0.17 | 0.14      | 0.17  |
| 4             | 2             | 0.12       | 0.19 | 0.155     | 0.19  |
| 5             | 2             | 0.145      | 0.23 | 0.19      | 0.235 |
| 6             | 3             | 0.175      | 0.28 | 0.23      | 0.29  |
| 7             | 4             | 0.210      | 0.34 | 0.28      | 0.35  |
| 8             | 4             | 0.26       | 0.42 | 0.34      | 0.43  |
| 9             | 5             | 0.31       | 0.50 | 0.42      | 0.52  |
| 10            | 6             | 0.36       | 0.56 | 0.48      | 0.61  |
| 11            | 7             | 0.41       | 0.62 | 0.54      | 0.69  |
| 12            | 8             | 0.44       | 0.67 | 0.55      | 0.72  |

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

Circuit : 1 (25A)

| Position<br>A | Position<br>B | Aspiration |       | Injection |       |
|---------------|---------------|------------|-------|-----------|-------|
|               |               | DME        | DLE   | DME       | DLE   |
| 1             | 1             | 0.072      | 0.11  | 0.092     | 0.112 |
| 2             | 1             | 0.080      | 0.123 | 0.102     | 0.127 |
| 3             | 2             | 0.086      | 0.132 | 0.110     | 0.137 |
| 4             | 2             | 0.095      | 0.148 | 0.123     | 0.15  |
| 5             | 2             | 0.118      | 0.175 | 0.148     | 0.18  |
| 6             | 3             | 0.14       | 0.21  | 0.178     | 0.23  |
| 7             | 3             | 0.17       | 0.25  | 0.21      | 0.27  |
| 8             | 4             | 0.20       | 0.30  | 0.255     | 0.33  |
| 9             | 5             | 0.25       | 0.36  | 0.31      | 0.40  |
| 10            | 6             | 0.28       | 0.42  | 0.36      | 0.46  |
| 11            | 7             | 0.32       | 0.48  | 0.4       | 0.50  |

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

Circuit : 1/2 (12.5A)

| Position<br>A | Position<br>B | Aspiration |       | Injection |       |
|---------------|---------------|------------|-------|-----------|-------|
|               |               | DME        | DLE   | DME       | DLE   |
| 1             | 1             | 0.058      | 0.085 | 0.075     | 0.090 |
| 2             | 1             | 0.064      | 0.094 | 0.082     | 0.10  |
| 3             | 1             | 0.070      | 0.10  | 0.088     | 0.11  |
| 4             | 2             | 0.076      | 0.112 | 0.095     | 0.12  |
| 5             | 2             | 0.091      | 0.135 | 0.112     | 0.145 |
| 6             | 3             | 0.11       | 0.160 | 0.135     | 0.172 |
| 7             | 3             | 0.13       | 0.19  | 0.16      | 0.21  |
| 8             | 4             | 0.155      | 0.23  | 0.19      | 0.25  |
| 9             | 5             | 0.18       | 0.27  | 0.22      | 0.29  |
| 10            | 6             | 0.20       | 0.30  | 0.25      | 0.32  |

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

Circuit : 1/4 (6.25A)

| Position<br>A | Position<br>B | Aspiration |       | Injection |       |
|---------------|---------------|------------|-------|-----------|-------|
|               |               | DME        | DLE   | DME       | DLE   |
| 1             | 1             | 0.045      | 0.065 | 0.06      | 0.07  |
| 2             | 1             | 0.05       | 0.073 | 0.065     | 0.078 |
| 3             | 1             | 0.055      | 0.08  | 0.07      | 0.085 |
| 4             | 2             | 0.06       | 0.088 | 0.075     | 0.093 |
| 5             | 2             | 0.07       | 0.105 | 0.085     | 0.11  |
| 6             | 3             | 0.085      | 0.13  | 0.10      | 0.13  |
| 7             | 3             | 0.095      | 0.15  | 0.115     | 0.16  |
| 8             | 4             | 0.105      | 0.17  | 0.135     | 0.18  |
| 9             | 5             | 0.11       | 0.18  | 0.15      | 0.20  |

Electrode CUIVRE – Pièce ACIER

Circuit : 1/8 (3.12A)

| Position<br>A | Position<br>B | Aspiration |     | Injection |      |
|---------------|---------------|------------|-----|-----------|------|
|               |               | DME        | DLE | DME       | DLE  |
| 1             | 2             | 0.034      |     | 0.05      |      |
| 2             | 2             | 0.037      |     | 0.052     | 0.07 |
| 3             | 2             | 0.04       |     | 0.055     | 0.08 |
| 4             | 2             | 0.044      |     | 0.058     | 0.09 |
| 5             | 2             | 0.05       |     | 0.066     | 0.1  |
| 6             | 3             | 0.056      |     | 0.075     | 0.11 |
| 7             | 4             | 0.061      |     | 0.082     | 0.13 |
| 8             | 4             | 0.065      |     | 0.087     | 0.15 |