

Chapitre 3 – Usinage par procédés non conventionnels

3.1. Introduction

Ce n'est qu'en 1950 que l'on a commencé à travailler pour la première fois avec les procédés d'usinage électriques. Etant basés sur l'enlèvement de matière par décharge électrique, l'intérêt de cette technique fut admise par tous les pays industrialisés [1].

On distingue l'application de ce procédé dans l'aéronautique, l'industrie nucléaire et surtout l'industrie automobile, et l'industrie électronique.

On parlera d'usinages non conventionnels en référence à des usinages ne faisant pas appel à la « coupe des métaux » définie dans le chapitre précédent. L'appellation « Procédés non-conventionnels » est utilisée pour désigner un ensemble de techniques de production relativement récentes. L'emploi a été rendu nécessaire par l'usage croissant de matériaux à caractéristiques mécaniques élevées, pour lesquels les procédés conventionnels étaient limités [1].

3.2. Classification

De nombreux matériaux naturels ont été façonnés par l'action de la chaleur, de la lumière, de l'eau, des solutions chimiques, de l'énergie électrique, du vent, de procédés abrasifs. Les procédés non-conventionnels utilisent le courant électrique, la lumière amplifiée, des gaz, des abrasifs libres, des solutions chimiques, ou même l'eau comme moyens d'usinage plutôt qu'un outil de coupe ou d'abrasion conventionnel. Parmi ces procédés nous distinguons :

- Procédés à action mécanique :
 - Jet d'eau et jet d'eau abrasif,
 - Usinage ultrasonique.
- Procédés électrochimiques :
 - Usinage électrochimique,
 - Ébavurage et rectification électrochimiques.
- Procédés thermiques :
 - Electroérosion,
 - Laser, plasma.
- Procédés chimiques.

3.3. Procédés à action mécanique

3.3.1. Jet d'eau et jet d'eau abrasif

3.3.1.1. Historique

- En 1940, naissance de l'utilisation du jet d'eau en pression pour l'industrie minière,
- En 1968, Invention du premier prototype de la machine de découpe au jet d'eau,
- En 1979, MOHAMED HASHICH et l'abrasif,
- En 2010, Lancement de la technologie au monde du 3D.

3.3.1.2. Principe

Le découpage au jet d'eau est un procédé de fabrication qui utilise un jet d'eau hyperbare pour découper la matière (Plastique, organique, métallique, composite, etc.).

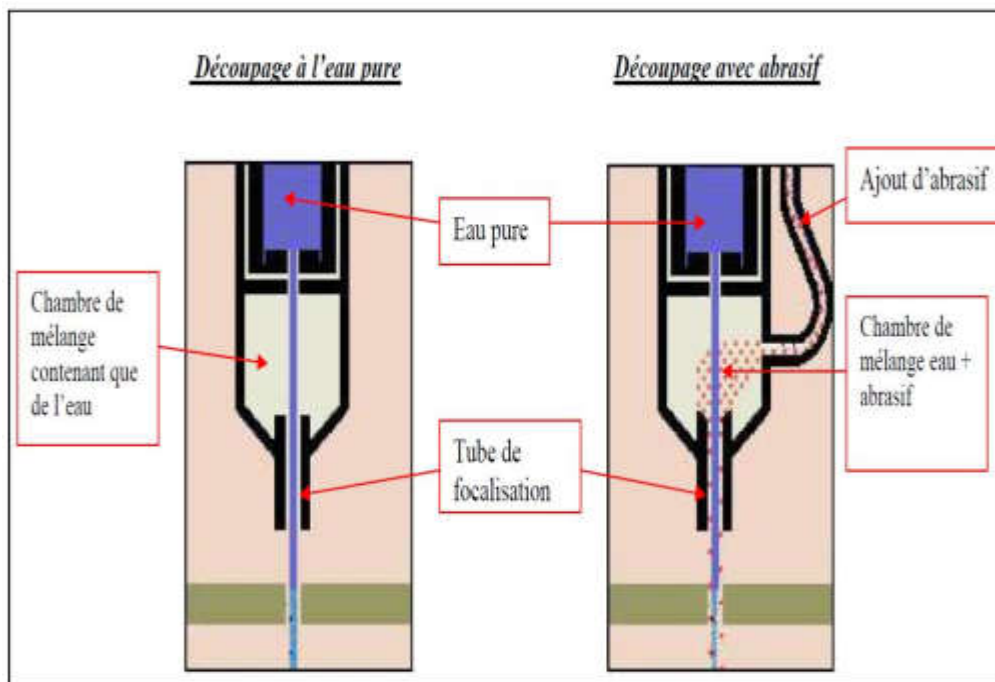


Fig. 3.1. Schéma découpage à l'eau pur ou à l'eau + abrasif [1].

Paramètre :

- Pression de 800 à 4000 bars,
- Ajout de particules abrasives (silicates, alumine) pour la découpe de l'acier et du béton,
- Buse d'injection en saphir diamètre d'injection de 0,075 à 0,5 mm,
- Vitesse du jet: 1000 m/s,
- Vitesse de coupe: 1m/min pour des épaisseurs jusqu'à 100 mm,
- Découpe à sec due à la grande pression,

3.3.1.3. Avantages et inconvénients :

- Coupe à froid sans influence thermique,
- Facilement réglable,
- Précision (quelques $1/100^{\text{èmes}}$ du mm),
- Coefficient d'utilisation optimal de la matière grâce à la réduction maximale des distances entre les pièces,
- Usinage non polluant et propre sans dégagement de gaz de fumées toxiques,
- Productivité élevée grâce aux installations à plusieurs têtes de découpe.
- Limitation quant à la forme et à la profondeur de pénétration,
- Durée de vie des buses (200 heures sous 4000 bars),
- Coût de l'installation élevé (filtration et adoucissement de l'eau).

3.3.1.4. Usinage avec Jet d'eau pure

On utilise la découpe au Jet d'eau pure pour les matériaux tendres. Il permet la découpe de matériaux ductiles ou composites. Avec des buses de coupe de 0,08 mm à 0,30 mm (sertie d'un saphir industriel). Le débit d'eau est fonction de la pression et du diamètre de la buse, figure 3.2.

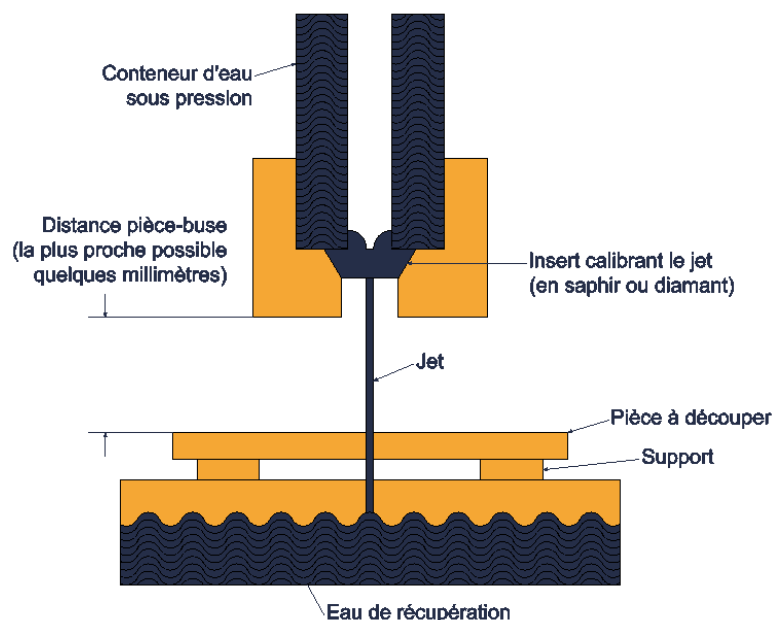


Fig. 3.2. Découpe jet eau.

Applications

- Matériaux d'isolation,
- Mousse,
- Joints et garnitures,
- Plastiques et caoutchouc,
- Tapis et textiles,
- Intérieur automobile,
- Couches jetables,
- Alimentaire.

3.3.1.5. Usinage avec jet d'eau abrasif

On utilise Jet d'eau abrasif dans l'usinage des pièces composés de matériaux les plus durs et les plus épais. Avec des buses de coupe de 0,20 mm à 0,40 mm (sertie d'un saphir ou d'un diamant industriel).

Principe :

Le système de découpe à l'abrasif comprend :

- un injecteur d'abrasifs,
- un doseur d'abrasifs.

Les abrasifs utilisés sont caractérisés par :

- Leur dureté,
- Leur dimension granulométrie,
- La matière : composition,
- Leur forme.

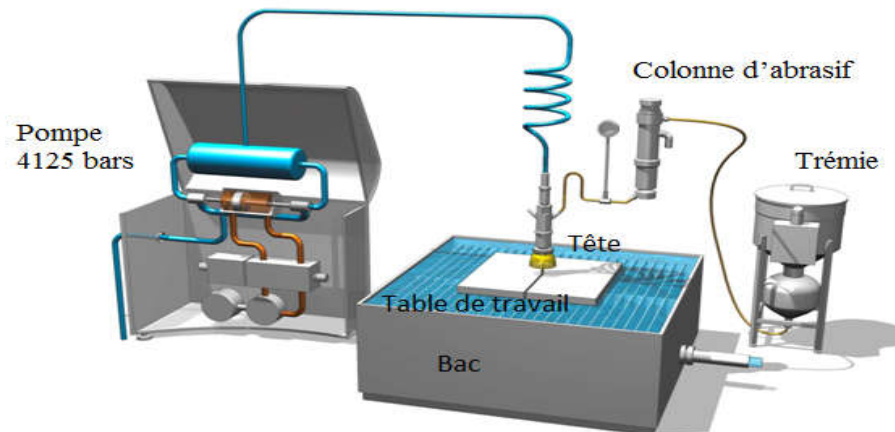


Fig. 3.3. Installation d'un jet d'eau abrasif.

Paramètre :

- Jet d'eau Abrasifs:
 - Al_2O_3 , dioxyde de silicium,
 - Diamètre de l'orifice = 0.25 à 0.63 mm.
- Gaz + abrasifs :
 - gaz = air, azote, hélium, dioxyde de carbone,
 - Pression de 0.2 à 1.4 Mpa,
 - Diamètre orifice: 0.075 à 1.0 mm,
 - Distance orifice-pièce = 3 à 75 mm.

Applications :

- Opérations : Finition, ébavurage, nettoyage, séparation des pièces, coupe des matériaux durs: céramiques, pierres, etc,
- Tous types de métaux : Aluminium, acier, titane, cuivre, laiton, alliages, etc,
- Pierre et marbre,
- Verre (sauf le verre trempé),
- Matériaux céramique composites,
- Lamine,
- Matériaux céramiques,
- Carbure,
- De nombreux autres matériaux.

3.3.2. Usinage ultrasonique

L'usinage par ultrasons est un procédé de reproduction de forme par abrasion particulièrement adapté à l'usinage des matériaux durs, fragiles et cassants (verres, céramiques, quartz, pierre précieuse, semi-conducteur...).

Il s'appuie sur trois phénomènes physiques pour enlever la matière :

- le cisaillement,
 - l'érosion,
 - l'abrasion.
-

Ainsi cette méthode consiste à projeter des particules abrasives très dures sur la pièce à usiner, à l'aide d'une **sonotrode**, vibrant à fréquence ultrasonore.

Caractéristiques :

Outil: Acier rapide, Amplitude: 0.075 mm, Fréquence : 20 000 Hz,

Eau + 20 à 60 % des particules abrasives (SiC, B₄C, Al₂O₃).

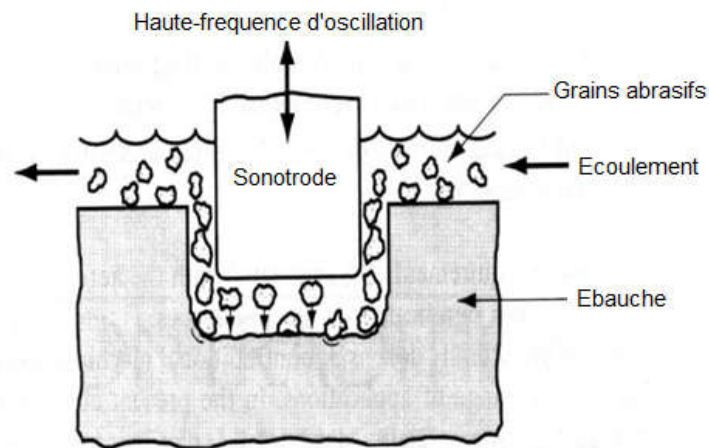


Fig. 3.4. Principe de l'abrasion ultrasonore.

Les particules sont amenées dans la zone de travail par un fluide porteur (par ex. l'eau). Un flux constant assure l'évacuation des copeaux et le renouvellement des grains abrasifs. Plus l'amplitude de vibration est grande plus le débit de matière enlevé est grand

On a donc ainsi trois phénomènes :

- **Une action mécanique** due à la projection et au martèlement des grains abrasifs contre la surface de la pièce,
- **Une érosion de cavitation** due aux variations de pression au sein du liquide, engendrées par les variations de la **sonotrode**.
- **Une action chimique** due au fluide porteur : cette action est le plus souvent inutilisée.



Fig. 3.5. Machine d'usinage a ultrasons.

Performances de l'usinage ultrasonique :

Le procédé peut être caractérisé par trois critères principaux (performances) :

- Débit de matière ;
- Usure relative de la sonotrode ;
- Etat de surface.

Les performances dépendent essentiellement :

- Du matériau à usiner,
- Du matériau de la sonotrode,
- Du matériau des grains abrasifs,
- D'autres paramètres (Concentration, paramètres ultrasonores, charge statique).

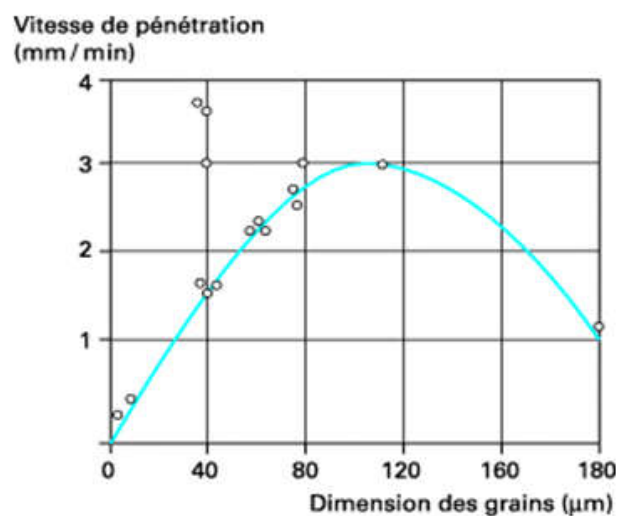


Fig. 3.6. Vitesse de pénétration en fonction de la dimension des grains (usinage du verre).

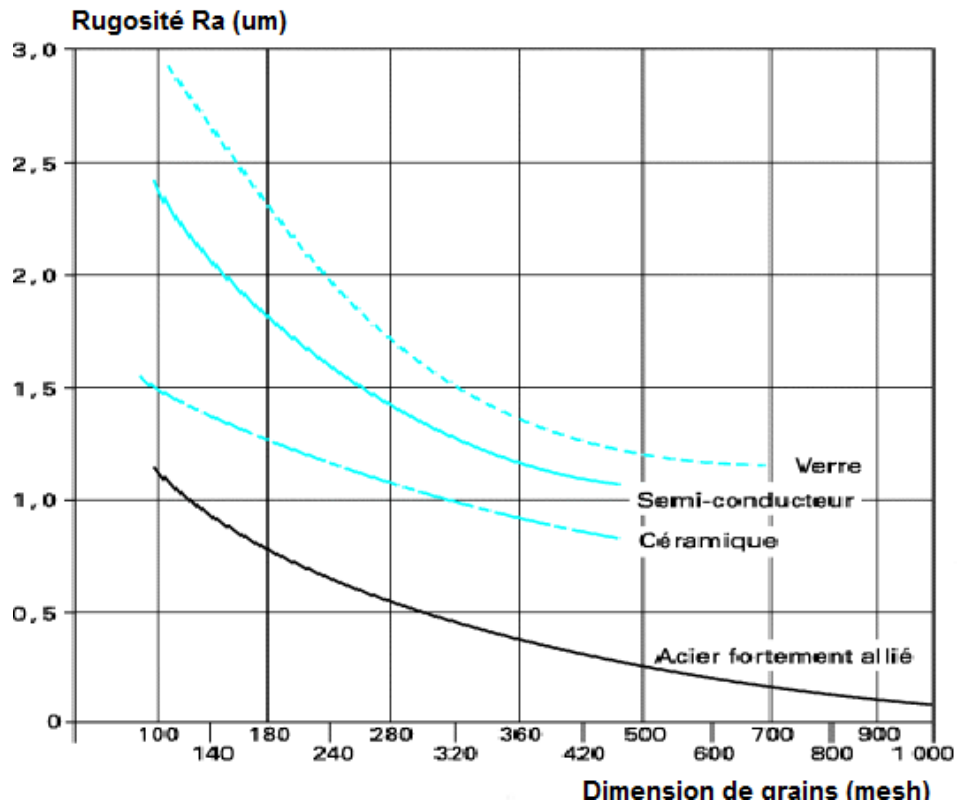


Fig. 3.7. Qualité de surface en fonction de la dimension des grains pour différents matériaux.

Quelques exemples : Pièces usinées par ultrasons.



Fig. 3.8. Pièces usinées en graphite.

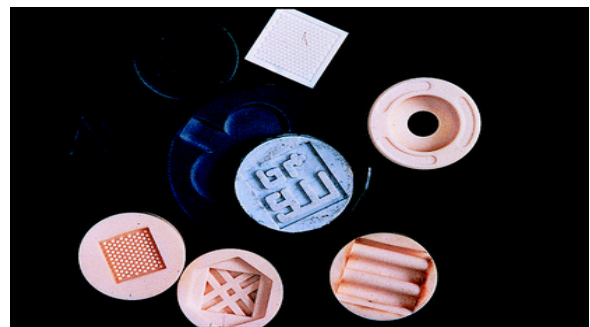


Fig. 3.9. Pièces usinées en céramiques.

3.4. Procédés électrochimiques

3.4.1. Principe

La pièce métallique qui sert d'anode (+) est raccordée à un courant continu, l'outil sert de cathode (-), le tout arrosé par une solution d'eau salée injectée sur les surfaces à usiner attirant les ions de métal de la pièce.

- L'outil est l'électrode,
- ce procédé est plus rapide que le chimique mais il y'a dégagement d'hydrogène et d'oxygène,
- Recyclage des boues dangereuses ($4\text{Fe}(\text{OH})_3$),
- L'outil ne s'use que par contact avec l'électrolyte.

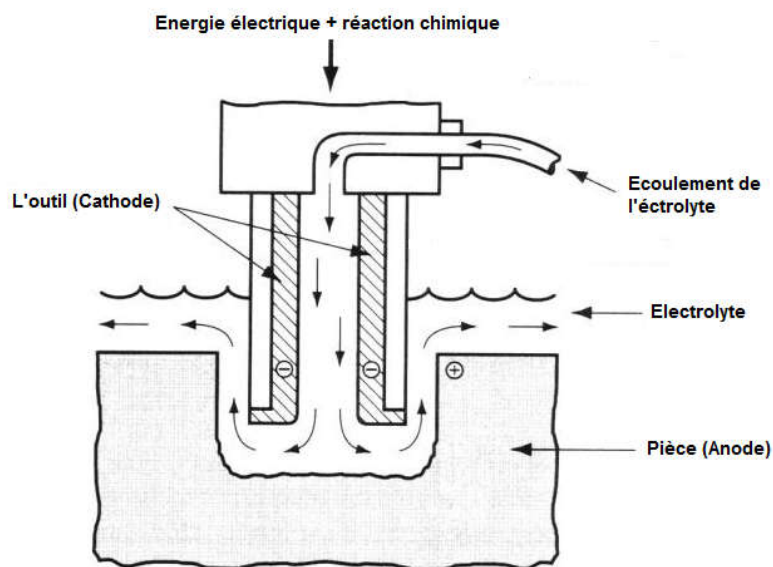


Fig. 3.10. Coupe par dissolution anodique.

3.4.2. Applications

- Usinage des matériaux conducteurs d'électricité (Al, Cu, Fe, Ni, aciers),
- Usinage des matériaux frittés,
- Usinage Matériaux durs ou difficiles-à-usiner ou pour des géométries complexes,
- Formes irrégulières et complexes des moules,
- Perçage des trous non ronds,
- Ébavurage,
- Rectification plane ou cylindrique,
- Usinage de matrices ou moules, ébavurage, affûtage,
- Possibilités : précision 0,01 mm en rectification et 0,1 mm en défonçage.

3.4.3. Avantage et inconvénients

- Pas de contact, peu de dommage à la pièce,
- Pas ou peu d'usure de l'outil,
- Pas de bavures,
- L'absence d'opération d'ébauche,
- 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,
- Vitesse d'usinage de 0,1 à 2 mm/min (10 fois plus rapide que l'électroérosion à enfonçage),
- Les qualités de surface de l'électrode sont reproduites à valeur identique,
- Rugosité pouvant atteindre $Ra = 0,03 \mu\text{m}$,
- Pas de contrainte mécanique sur la pièce.
- Coûts du système électrique,
- Coûts de traitement de l'électrolyte,
- Problèmes de corrosion,
- Difficultés inhérentes à l'électrolyte,
- À l'existence de pressions hydrauliques élevées (inférieures à 25 bars),
- Aux études et à la mise au point de(s) l'outil(s).

Exemples d'usinage électrochimique

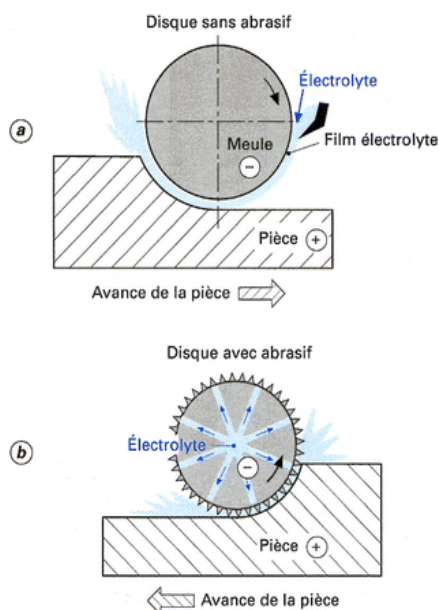


Fig. 3.11. Rectification électrochimique.

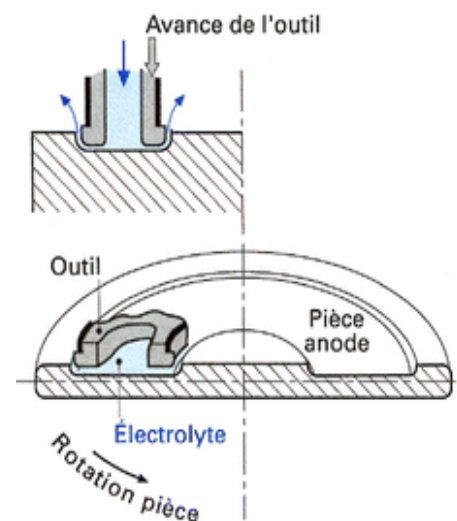


Fig. 3.12. Tournage électrochimique.

Exemples de pièces obtenues par procédé électrochimique

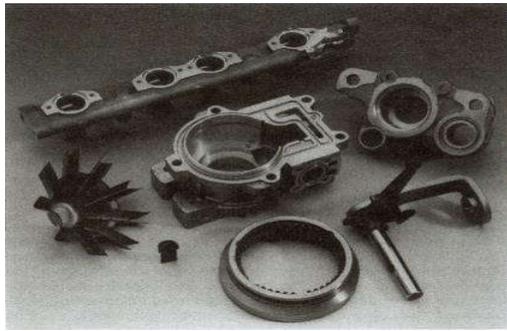


Fig. 3.13. Exemples de pièces ébavurées.



Fig. 3.14. Exemples de pièces usinées.

3.5. Procédés thermiques

3.5.1. Usinage par électroérosion

3.5.1.1. Définition

Le principe de l'usinage par électroérosion repose sur l'utilisation des décharges électriques (étincelages) qui engendrent des températures très élevées qui fondent ou évaporent le métal au voisinage de l'électrode.

L'électroérosion est un procédé d'usinage moderne offrant quantité d'avantages. La pièce et l'outil sont placés de telle sorte qu'ils ne sont pas en contact. Il reste un espace qui est alors comblé avec du liquide isolant.

On fait passer un courant électrique entre la pièce et l'outil. Une étincelle se forme et un petit cratère se forme. L'érosion constante permet l'usinage de la pièce, figure 3.15.

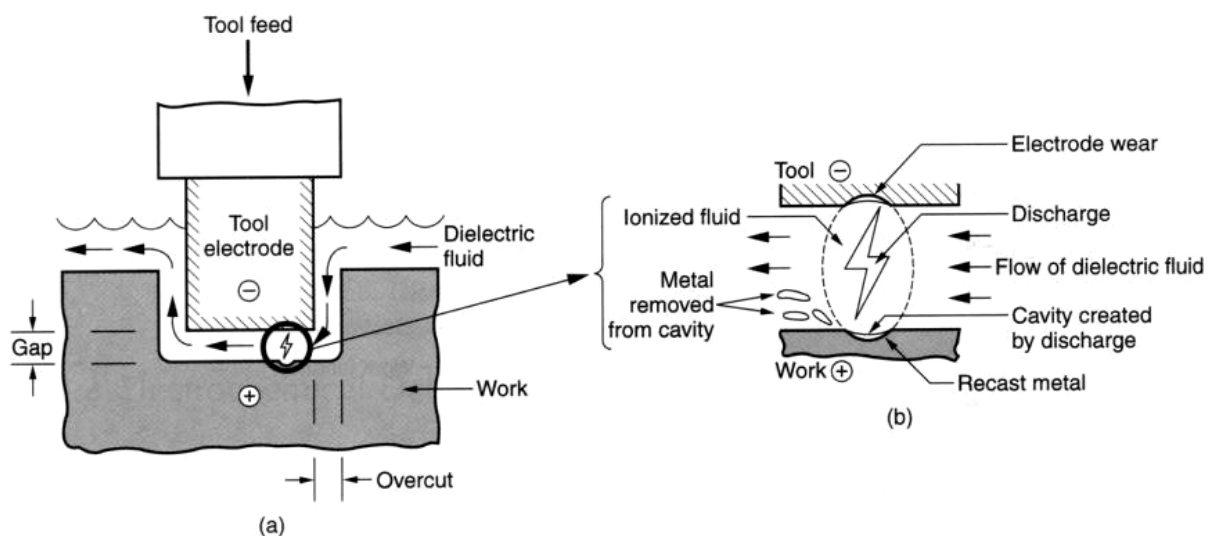


Fig. 3.15. Usinage à l'électroérosion à l'électrode.

3.5.1.2. Principes de fonctionnement

L'usinage par électroérosion se décompose en trois phases comme suit:

a. Phase 1 : Phase de construction :

La phase d'amorce/de construction comprend la mise en place des conditions initiales qui consistent en : l'application d'une tension (1) entre les électrodes amenant à la création d'amorces (2) suivie du claquage (3) du diélectrique et enfin de l'apparition du plasma, figure 3.16.a.

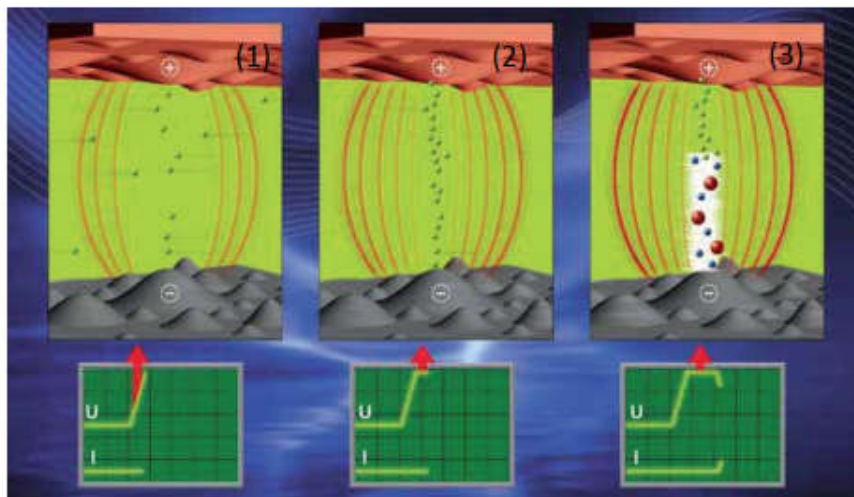


Fig. 3.16.a. Usinage à l'électroérosion : Phase de construction.

b. Phase 2 : Phase de décharge :

Cette phase d'échauffement/de décharge comprend le développement du plasma (1) à l'entrefer, ainsi que l'échauffement du matériau et de l'électrode par le plasma (2), jusqu'à ce que le circuit électronique coupe l'alimentation du plasma, ou que le plasma se relaxe naturellement (3), figure 3.16.b.

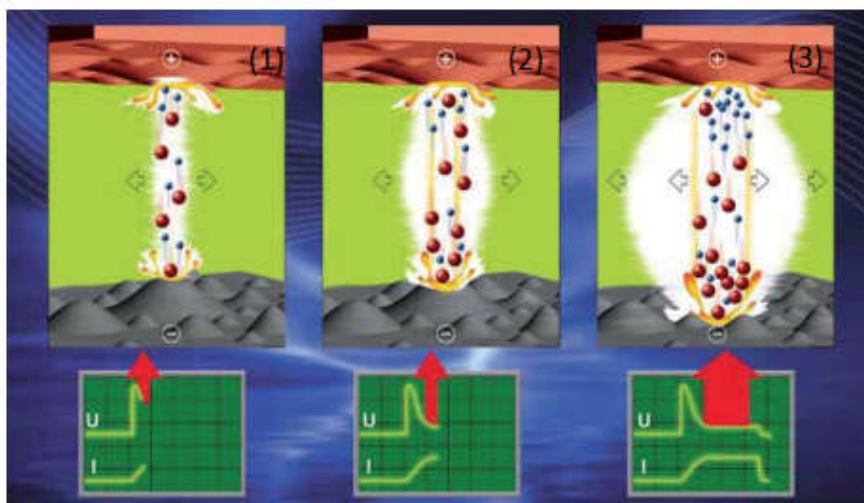


Fig. 3.16.b. Usinage à l'électroérosion : Phase de décharge.

c. Phase 2 : Phase de rupture :

S'ensuit la troisième étape, nommée « phase d'enlèvement » ou phase de rupture. L'apport de chaleur est réduit lorsque le courant baisse. Le nombre de particules chargées électriquement diminue rapidement et la pression s'effondre, ainsi que le canal de décharge. Le métal fondu surchauffé s'évapore dans une explosion et entraîne avec lui le matériel fondu, figure 3.16.c.

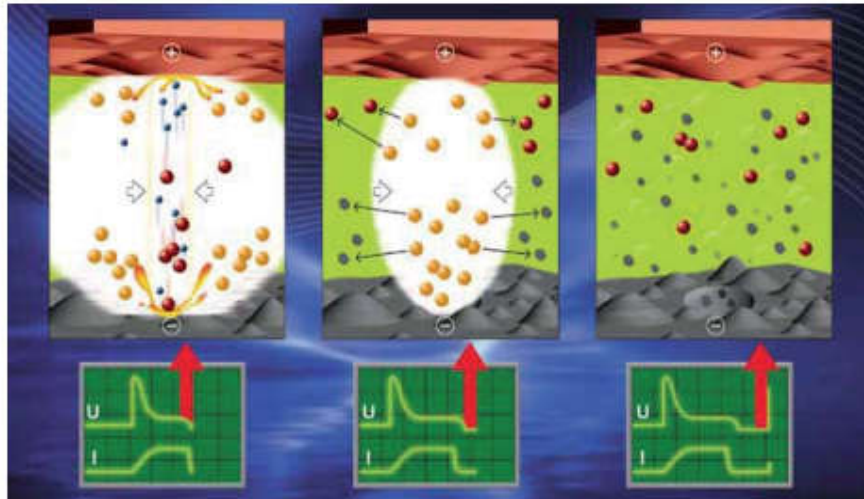


Fig. 3.16.c. Usinage à l'électroérosion : Phase de rupture.

3.5.1.3. Caractéristiques de l'usinage

- Usinage sans déformation (faible dimension, pas de contact pièce-outil),
- Usinage de métaux durs, traités ou réfractaires,
- Précision de l'ordre de 0.01 mm jusqu'à 2 μm en finition,
- Reproduction automatique de forme,
- Obtention de surfaces complexes,
- Usure de l'électrode (difficile à contrôler),
- Débit maximal de copeaux/ébauche ($5\text{cm}^3/\text{min}$) et finition ($0.05\text{cm}^3/\text{min}$).

3.5.1.4. Applications

- Usinage de matrices de forge et moule de fonderie,
- Découpage au fil (contour de pièces, analogie avec scie à ruban),
- Moyens pratiquement réservés à l'obtention d'outillage,
- Pièces minces,
- Perçage des trous à axe non perpendiculaire à une surface plane,
- Usinage des matériaux conducteurs durs.

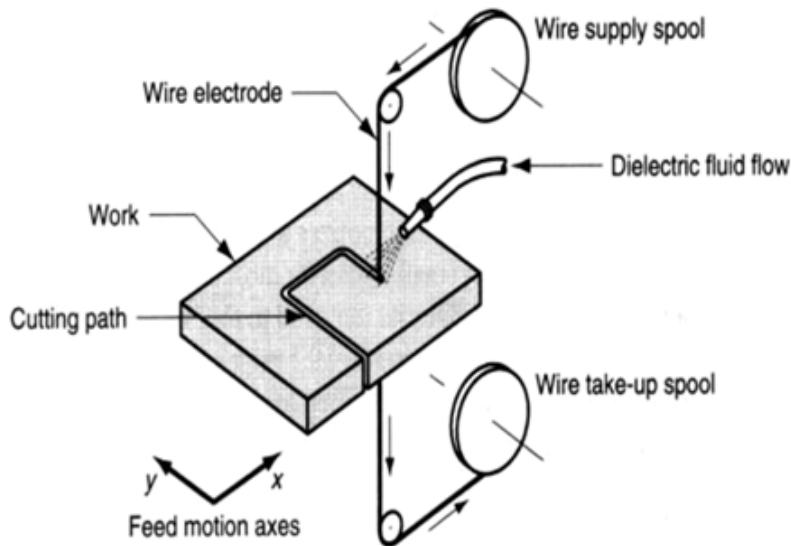


Fig. 3.17. Usinage à l'électroérosion à fil.

3.5.2. Usinage au Laser

3.5.2.1. Définition

La découpe laser est un procédé de fabrication qui consiste à découper la matière grâce à une grande quantité d'énergie générée par un laser et concentrée sur une très faible surface. Cette technologie est majoritairement destinée aux chaînes de production industrielles, mais peut également convenir aux boutiques, aux établissements professionnels et aux tiers-lieux de fabrication.» La gravure laser se fait avec la même technologie, mais en utilisant une puissance laser réduite.

Il y a différents types de milieux actifs. Le milieu actif peut être solide (Ex. Laser YAG), liquide (Colorants/Dye) ou gazeux (Ex. Laser CO₂, Laser Excimère, Vapeur de cuivre), YAG et CO₂ sont les deux types de lasers les plus utilisés en traitement des matériaux (découpe, soudage, marquage, etc.).

Ces différents types de milieux actifs conditionnent la longueur d'onde du laser (ex : Infra rouge, Visible (rouge, vert, bleu), Ultra-violet).

LASER signifie amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement:

L : Light

A : Amplification

S : by Stimulated

E : Emission

R : of Radiation

3.5.2.2. Fonctionnement du laser

L'énergie apportée au milieu actif par le mécanisme de pompage (lampes flash, décharges électriques...) est restituée sous forme d'énergie lumineuse qui, après concentration dans la cavité optique, constitue le faisceau Laser.

Ce faisceau est ensuite transporté par jeu de miroirs ou éventuellement par fibre optique dans le cas des Lasers YAG, jusqu'à la tête de travail, constituée d'une lentille de focalisation et d'une buse à travers laquelle est insufflé un gaz d'assistance.

Le laser est constitué de 4 éléments :

- Un milieu actif ou il y a les atomes que l'on va pomper,
- Une source de pompage, grâce à celle-ci on envoie l'énergie dans le milieu actif,
- Un miroir réfléchissant,
- Un miroir de sortie.

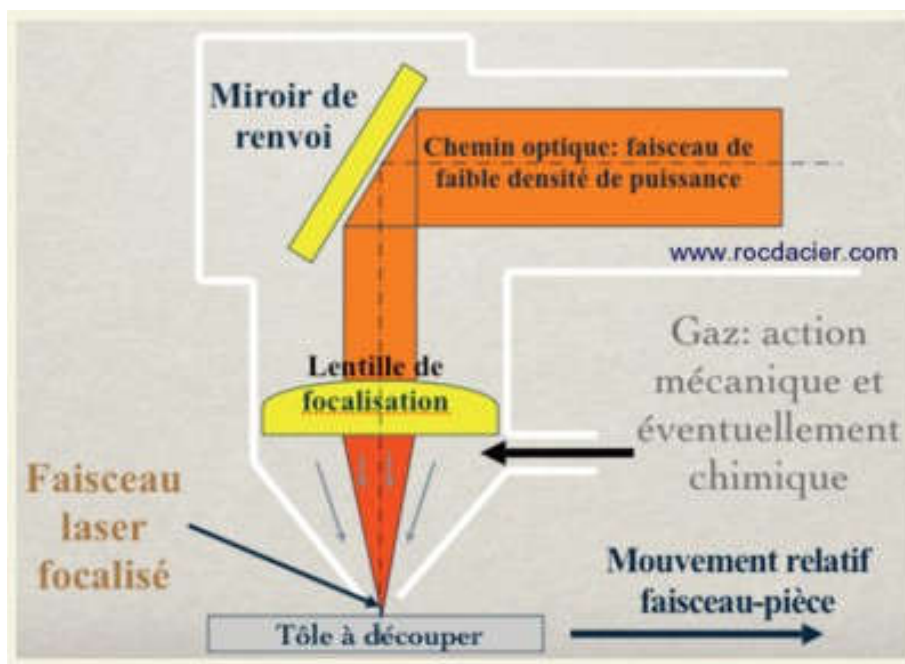


Fig. 3.18. Principe de fonctionnement du Laser.

Il se caractérise par :

- Epaisseur maximale à découper : 10 mm,
- Puissance de 20 à 25 kW dans l'industrie (contre quelques mW dans le médical),
- Diamètre de la buse varie de 0,7 à 2 mm,
- Possibilité d'usiner dans des zones difficiles d'accès,
- Soudage de matériaux différents.

Il existe trois principaux types de lasers :

- Les lasers CO₂ (majorité des lasers sur le marché).
- Les lasers YAG (ou Grenat d'Yttrium et d'Aluminium). Le faisceau laser est produit par l'excitation d'un cristal de synthèse par une décharge électrique ou une source lumineuse,
- Les lasers à fibres optiques.

3.5.2.3. Laser à source CO₂ :

3.5.2.3.1. Principe :

Le mélange est généralement constitué de CO₂ pour l'émission Laser, d'AZOTE pour permettre l'excitation ou "pompage" et d'HELIUM pour désexciter et refroidir la cavité optique. D'autres gaz peuvent également intervenir pour optimiser le fonctionnement de certains Lasers (O₂, CO₂, H₂...). Ce mélange gazeux couplé à une décharge électrique pour produire le faisceau laser.

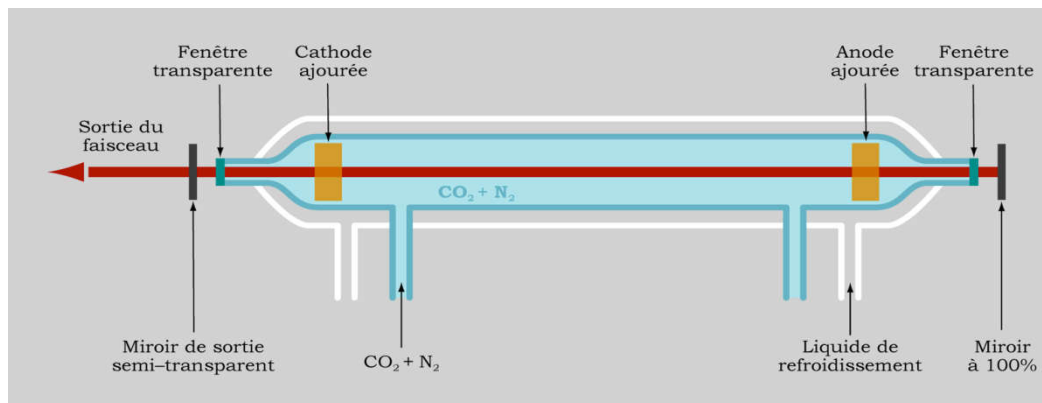


Fig. 3.19. Principe du Laser CO₂.

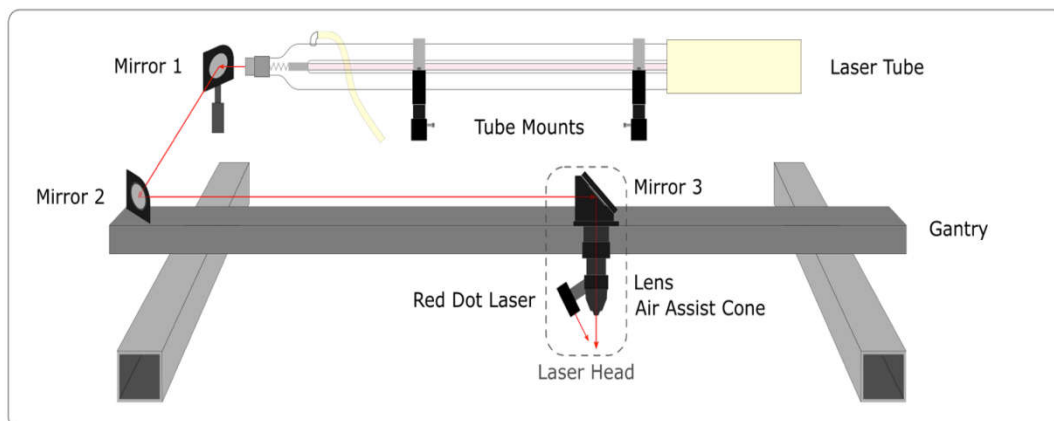


Fig. 3.20. Procédé du Laser à source CO₂.

3.5.2.3.2. Avantages et inconvénients :

- Convient principalement pour travailler des matériaux non-métalliques et la plupart des plastiques,
- Les lasers au CO₂ ont un rendement relativement élevé et une très bonne qualité de faisceau qui permet une découpe propre sans besoin d'ébavurage,
- Ils sont par conséquent un des types de lasers les plus répandus,
- Danger des rayons (nécessite des protections importantes),
- Utilisés dans beaucoup de Lab-Fab,
- Investissement lourd.

3.5.2.3.3. Applications principales

- Soudage,
- Découpage,
- Traitement de surface,
- Marquage (identification de pièces...).

3.5.2.3.4. Les matériaux travaillés

- Bois, Acrylique, Verre, Papier, Textiles, Plastiques, Foils & films, Cuir, Pierre.



Fig. 3.21. Exemple de forme réalisé au laser à source CO₂.

3.5.2.4. Laser YAG, YOV (laser à cristal)

3.5.2.4.1. Principe

Le faisceau laser est produit par l'excitation d'un cristal de synthèse par une décharge électrique ou une source lumineuse, dont :

- Nd : YAG (grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme),
 - Nd : YVO (orthovanadate d'yttrium dopé au néodyme),
 - Longueur d'onde 1.064 micromètres.
-

Le procédé Laser YAG : ces types de laser ont un matériau d'usure, des diodes de pompage onéreuses. Celles-ci doivent être changées après environ 8000 à 15000 heures de laser maximum.

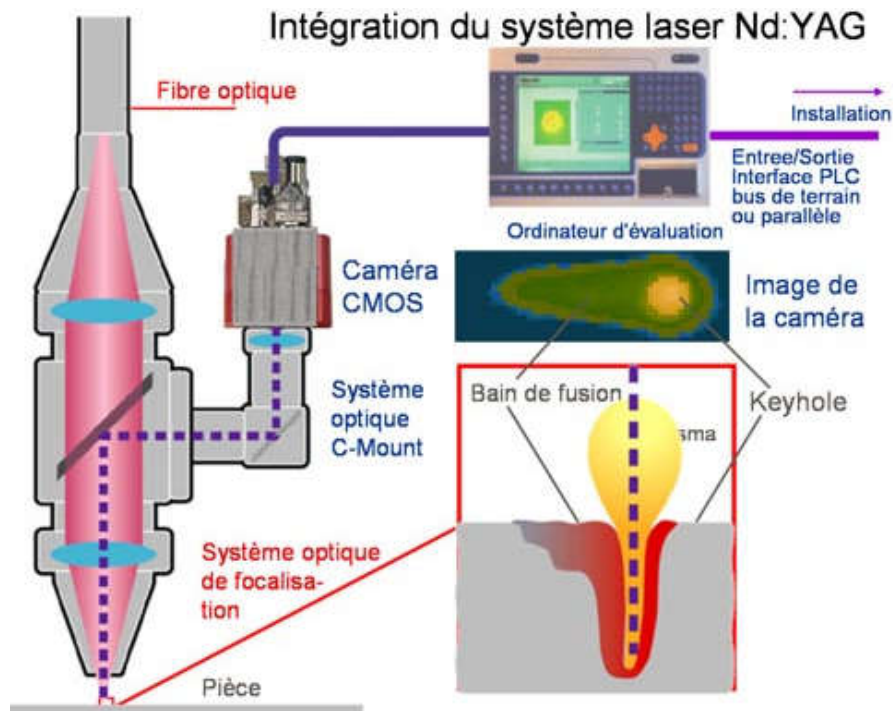


Fig. 3.22. Procédé du Laser YAG.

3.5.2.4.2. Avantages et inconvénients :

Contrairement aux lasers fibre, ces types de laser ont un matériau d'usure, des diodes de pompage onéreuses. Celles-ci doivent être changées après environ 8000 à 15000 heures de laser maximum. Même le cristal lui-même à une durée de vie bien plus réduite que le laser fibre.

3.5.2.4.3. Les matériaux travaillés

- Métaux,
- Métaux revêtus,
- Plastiques,
- Céramique.

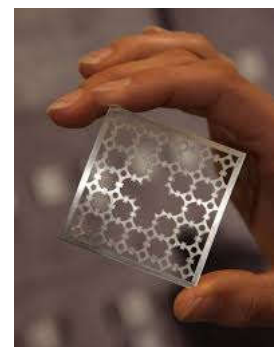


Fig. 3.23. Exemple de forme réalisé au Laser YAG.

3.5.2.5. Laser fibre

3.5.2.5.1. Principe

Les lasers à fibres optiques (développement le plus récent en matière de découpe laser). Le faisceau laser est généré dans une fibre active et acheminé au moyen d'une fibre de transport vers la tête de découpe de la machine.

Les lasers fibre font partie des lasers à solide. Ils produisent le faisceau laser au moyen de ce que l'on appelle un laser seed et l'amplifient dans des fibres de verre montées spécialement auxquelles de l'énergie est amenée via des diodes de pompage. Avec une longueur d'onde de 1,064 micromètre.

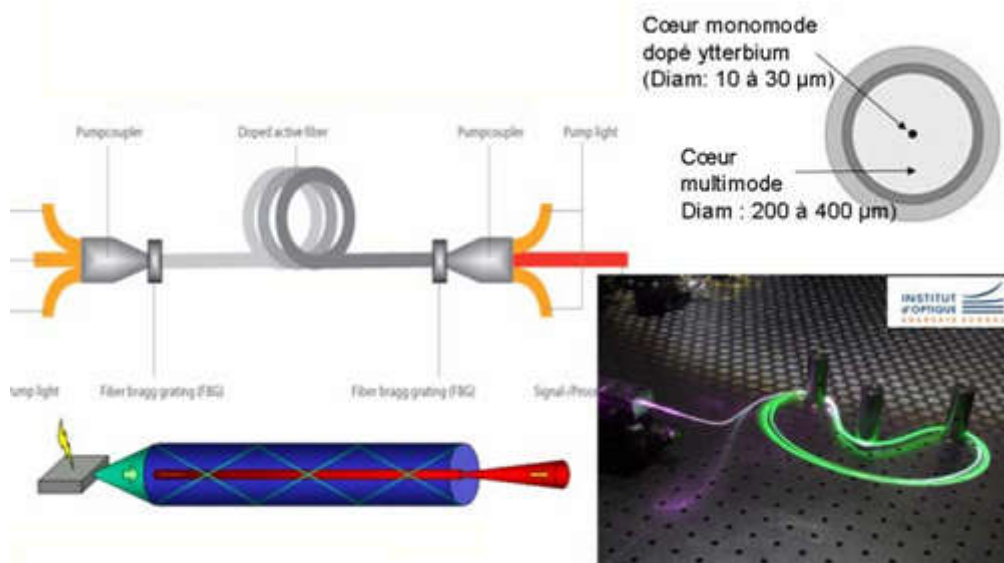


Fig. 3.24. Procédé du laser fibre.

3.5.2.5.2. Avantages et inconvénients :

- Les lasers fibre font partie des lasers à solide,
- Les lasers à fibre produisent un diamètre de focale particulièrement petit, ce qui fait que leur intensité est jusqu'à 100 fois plus élevée que les lasers au CO₂ de même puissance moyenne délivrée,
- Le laser fibre convient idéalement pour le marquage des métaux par recuit, pour les gravures sur métal et les marquages riches en contrastes des plastiques. Les lasers à fibre sont en principe sans entretien et se distinguent par leur longue durée de vie d'au moins 25 000 heures de laser.

3.5.2.5.3. Les matériaux travaillés

- Métaux,
- Métaux revêtus,
- Plastiques.



Fig. 3.25. Exemple de forme réalisé au Laser fibre.

3.5.3. Usinage au Plasma

3.5.3.1. Historique

- En 1950, Bob Gage d' Union Carbide conçoit une torche de soudage TIG hélium appelée Heliarc , en comprimant l'arc de soudage avec une buse et augmentant le flux de gaz.
- En 1957, Il a eu le brevet pour le coupage à l'arc plasma,
- Début des années 60, ils ne répondaient qu'à un besoin très spécifique dans un marché relativement restreint,
- Dans les années 70, les systèmes plasma étaient dispendieux, peu fiables et spécialisés en coupe d'acier inoxydable,
- En 1983, l'injection d'eau qui refroidissait la buse fait durer les consommables plus longtemps,
- Les dernières 10 années d'avancées rapides dans la qualité de coupe, la durée de vie des consommables et la polyvalence du plasma. Le plasma est maintenant un procédé de coupage thermique fiable et rentable.

3.5.3.2. Principe

Le PLASMA est un procédé de découpe par fusion localisée dans lequel le jet de gaz ou d'air comprimé chasse le métal porté à une température de fusion. La température générée par l'arc électrique est voisine de 18000°C. Le terme PLASMA est utilisé lorsque la matière gazeuse n'est plus composée d'atomes et de molécules, mais d'ions et d'électrons. Ces derniers apparaissent lors de la scission des molécules et des atomes. Cet état est atteint lorsque plusieurs conditions sont réunies (gaz, pression, température élevée). On nomme PLASMA, le quatrième état de matière.

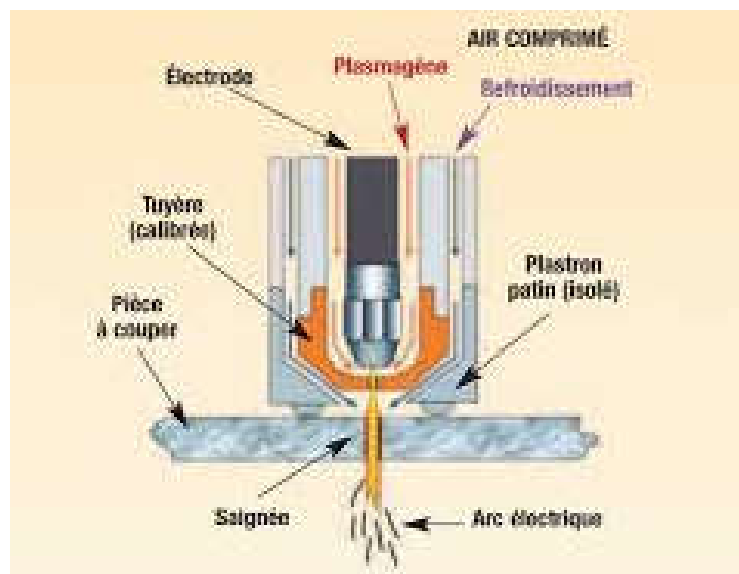


Fig. 3.26. Principe du coupage Plasma.

3.5.3.3. Fonctionnement du Plasma

- Création d'un arc électrique:** Entre une électrode en tungstène ou en zirconium et la pièce à couper, un arc électrique est créé. L'arc est très localisé.
- Ouverture du gaz ou du mélange plasmagène :** Grâce à une convection forcée au travers d'un orifice de faible diamètre, l'arc et le gaz sont dirigés sur une zone très précise. Le gaz devenu PLASMA dont le débit est suffisant, permet de chasser le métal en fusion.
- Découpe:** Après l'amorçage et le début de la coupe, il suffira de garder une hauteur constante, manuellement ou automatiquement sur certaines installations (machines de coupes) et de se déplacer pour effectuer la découpe voulue

3.5.3.4. Gaz plasmagènes

Les gaz plasmagènes ont pour rôle de faciliter l'amorçage de l'arc électrique et aussi de réduire l'usure des buses et des tuyères. Certaines torches PLASMA utilisent aussi en plus d'un vortex de gaz, un vortex d'eau pour concentrer davantage le jet de PLASMA. Les gaz plasmagènes sont :

- air comprimé,
- oxygène,
- azote,
- argon/hydrogène (mélange binaire),
- argon/hydrogène/azote (mélange ternaire).

3.5.3.5. Avantages et inconvénients

- Tous les matériaux conducteurs d'électricité pourront être utilisés par le PLASMA,
- Epaisseur 70 mm sur certaines installations,
- La précision du PLASMA est appréciable. Grace à la fusion localisée, la déformation est plus faible et permet des précisions de 0,2 mm environ sur des installations récentes,
- La qualité de coupe, la durée de vie des consommables.

3.6. Procédés chimiques

3.6.1. Définition

L'usinage chimique consiste à attaquer le métal à l'aide d'un agent chimique (alcali ou acide). C'est l'extension du procédé de gravure ou de décapage chimique.

3.6.2. Histoire

Déjà au 1er millénaire, les Arabes utilisaient l'action du nitrate de sodium (sel de nitre) sur les métaux, et au XVe siècle, une couche de bitume de Judée était déposée sur une plaque d'acier ou de cuivre, qui après séchage était incisée avec une pointe sèche dégageant ainsi le métal qui était attaqué à l'acide nitrique (gravure à l'eau-forte).

3.6.3. Principe

Après dégraissage et lavage, la pièce est protégée par un masque (appelé épargne) sur les parties qui ne doivent pas être attaquées. Puis la pièce est plongée dans un bain acide qui

attaque, de façon régulière, les parties non protégées (gravure). Un rinçage termine la phase d'usinage chimique.

Cette technique est très couramment utilisée pour la réalisation des circuits imprimés qui équipent aujourd'hui la grande majorité des appareils que nous utilisons (du rasoir électrique au téléviseur).

3.6.4. Deux techniques principales

- La découpe chimique enlève les parties non masquées sur toute l'épaisseur de la pièce. Les applications sont très nombreuses tant en électronique qu'en mécanique sur des pièces peu épaisses (0.01-3 mm).
- Le fraisage chimique appliqué à des pièces plus épaisses, creuse la surface sur une profondeur prédéfinie. Cette application est particulièrement employée en aéronautique pour l'usinage d'éléments de voilure de plusieurs mètres carrés, dans un but d'allègement. Technique également diffusée en héliogravure pour créer les alvéoles devant recevoir les encres d'impression.

3.6.5. Avantages

- 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.

3.7. Références

[1]. SLIMI HAMDI, « Etude et réalisation de matrice pour la fabrication d'un joint d'accouplement », Mémoire Master, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie (2015).

[2].
