

Partie II- Mise en forme par méthodes non-conventionnelles

II.1. Electroérosion

II.1.1. Principe du Mécanismes de l'enlèvement de matière

L'érosion des matériaux, due à des décharges électriques, a été observée depuis longtemps. C'est en effectuant une recherche sur la résistance des matériaux à l'érosion provoquée par des décharges électriques que deux savants russes eurent l'idée d'exploiter ce phénomène destructeur à des fins d'enlèvement de matière et de développer un procédé contrôlé d'usinage des métaux. La première machine d'étincelage fut présentée en **1943** par les époux **Lazarenko**.

Depuis, de nombreuses améliorations ont été apportées, faisant du procédé une réelle méthode d'usinage, utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie (outillage, aéronautique...).

Il est à noter d'emblée que la nature physique de l'enlèvement de matière au moyen de décharges électriques est un phénomène complexe, et qu'il n'est pas rare de voir des interprétations contradictoires.

L'usinage par électroérosion s'opère dans un liquide diélectrique : on applique entre les électrodes une tension qui est plus grande que la tension de claquage, fixée par le pouvoir isolant du diélectrique et la distance des électrodes (**figure II.1**). On observe trois phases : **[7]**.

- **l'initiation de la décharge**, appelée phase d'ionisation (**figure II. 2 a**) ; sous l'action du champ électrique, il se forme, par ionisation du diélectrique, un canal conducteur entre les deux électrodes. L'ionisation a lieu là où le champ électrique atteint une intensité maximale. Cette phase d'ionisation correspond à la rupture diélectrique et ne dure qu'un temps très bref (10 à 100 ns) par rapport à la décharge. Le canal conducteur est formé d'un plasma, gaz qui subit une ionisation à très haute température (3 000 à 12 000 K). Ce plasma est constitué par des atomes métalliques évaporés aux électrodes, des ions M et des électrons. Ces particules sont créées par les chocs violents que subissent les atomes portés à haute température, cette haute température résultant elle-même de l'échauffement du milieu provoqué par les chocs entre particules et atomes ;
- **la fusion et la vaporisation de la matière (figure II.2 b)** : pendant cette phase active, l'intensité du courant croît et la tension diminue. Pendant quelques microsecondes à quelques millisecondes, les particules attirées par les deux électrodes vont y libérer leur énergie cinétique et y provoquer un échauffement très important. Les particules positives et négatives se dirigent respectivement vers la cathode et l'anode. La décharge est fortement concentrée dans un canal de petite section, et il en résulte des densités de courant très élevées, de l'ordre de 10⁶ A/cm². Celles-ci entraînent des effets physico-thermiques importants : l'échauffement local des électrodes, la fusion et la vaporisation des matériaux qui les constituent, la dégradation du diélectrique. Des poches de matière fondue apparaissent aux deux électrodes. Autour du canal de plasma est créée une bulle

de gaz et une onde de choc se propage radialement dans le liquide. La bulle de vapeur croît de manière importante ;

- l'éjection de la matière (figure II.2 c) :** le circuit électrique est coupé, la bulle de vapeur se trouve entourée de liquide et de solides froids. À ce moment, la température dans la bulle de plasma est de 3 000 à 20 000 K. Des échanges thermodynamiques violents ont lieu. Selon les auteurs, la fin de la décharge est traduite par un effet hydrodynamique : la cavité croît jusqu'à ce que sa pression interne soit minimale, puis sous l'effet de la pression hydrostatique du diélectrique, son volume diminue. Elle se scinde alors en deux parties. Le front de fusion des matériaux des électrodes régresse. Les deux bulles implosent. Une partie du métal encore à l'état liquide est éjectée sous l'impact du liquide diélectrique qui a acquis une grande énergie cinétique durant l'implosion de la cavité. Le métal fondu éjecté se retrouve au sein du diélectrique sous la forme de petites sphérules et laisse un cratère sur chaque électrode. La partie de métal fondu non arrachée solidifie sur place.

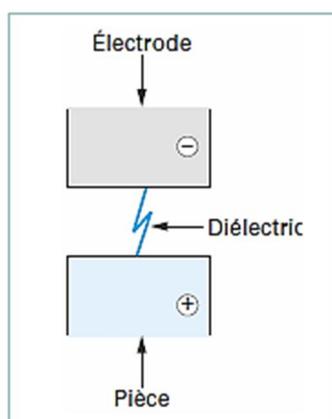


Figure. II.1 . Principe de l'électroérosion

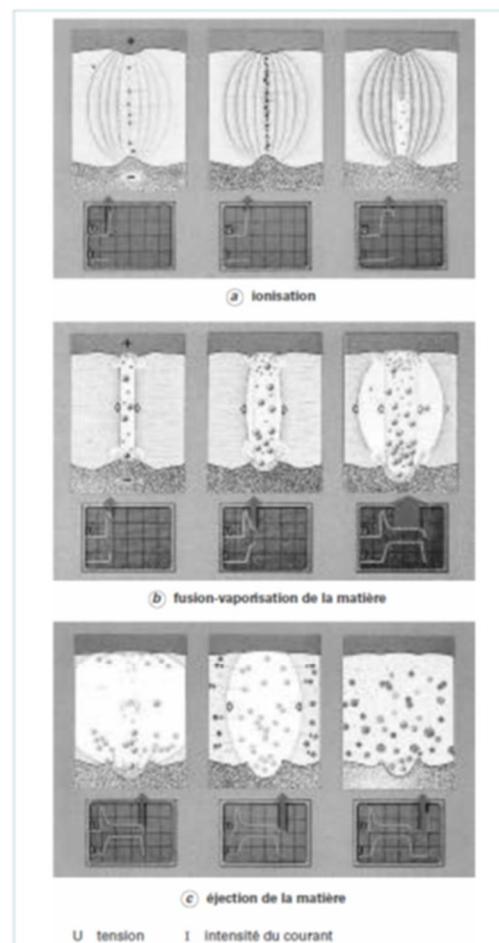


Figure. II.2 . Enlèvement de matière

II.1.2. Matériaux usinables. Matériaux pour outils. Diélectriques

II.1.2.1. Matériaux usinables

Le passage de la décharge électrique ne peut se faire que pour les matériaux ayant une conductivité électrique suffisante, de l'ordre de $10^{-2} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Selon les matériaux,

cette limite peut être plus élevée : on constate l'impossibilité d'usiner par électroérosion pour une conductivité électrique inférieure à $10^{-2} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ pour les céramiques à base de nitrure de silicium, inférieure à $1 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ pour des composites à base de Al_2O_3 , inférieure à $200 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ pour des composites à base de Si_3N_4 [7].

Le procédé est apte à usiner :

- les alliages métalliques (aciers ; alliages réfractaires à base de nickel, cobalt, titane ; alliages à base d'aluminium, cuivre, etc.) ;
- les graphites ;
- les céramiques conductrices ou semi-conductrices (SiC , B_4C , TiB_2 , ZrB_2 , TiAl , Ni_3Al , FeAl , etc.) ;
- certains matériaux composites (SiC-SiC par exemple) ;
- certains matériaux semi-conducteurs (silicium, germanium, etc.) ;
- des matériaux supraconducteurs ($\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_7$, par exemple) ;
- le diamant polycristallin.

Pour les matériaux céramiques ou composites, seuls ceux ayant un composant apportant une conductivité suffisante peuvent être usinés : les particules des composants non conducteurs sont fondues ou vaporisées par l'échauffement provoqué par l'électroérosion du composant conducteur, ou sont évacuées par la disparition du composant conducteur les entourant. On dope des céramiques non conductrices à l'aide de particules conductrices pour les rendre usinables par électroérosion (Sialon dopé au nitrure de titane, alumine dopée au carbure de titane, par exemple). Le même principe permet d'usiner le diamant polycristallin par attaque du liant.

L'électroérosion est plus performante pour certains matériaux que pour d'autres. La productivité est plus élevée pour les matériaux ayant les caractéristiques suivantes :

- basses températures de fusion et de vaporisation ;
- mauvaise diffusivité thermique.

Pour les matériaux composites ou frittés, composés d'un matériau conducteur et d'un matériau non conducteur, l'usinage par électroérosion est possible si :

- la conductivité générale est suffisante ;
- les éléments non conducteurs sont suffisamment petits pour être évacués lors de l'éjection du liquide du cratère. [7]:

II.1.2.2. Matériaux pour électrodes

Les qualités essentielles d'un matériau d'électrode sont de permettre un bon débit de matière sur la pièce, un faible enlèvement de matière sur l'électrode (faible usure), et d'être usiné ou fabriqué avec précision et à bas prix.

On utilisera pour les outils des matériaux difficiles à usiner par électroérosion, pour qu'ils résistent à l'usure, mais aussi faciles à usiner par les procédés conventionnels, pour la production de l'électrode outil. Ce sont des matériaux ayant les propriétés suivantes :

- hautes températures de fusion et de vaporisation, pour résister le plus possible à l'effet thermique des décharges ;

- haute diffusivité thermique, pour évacuer le plus possible d'énergie par conduction ;
- bonne usinabilité à l'outil coupant, pour être facilement usiné lors de la fabrication de l'électrode.

Le compromis entre ces propriétés conduit à utiliser les matériaux suivants :

- les graphites ;
- le cuivre et ses alliages ;
- des matériaux plus résistants, le molybdène, le tungstène et ses alliages.

Pour ces matériaux, l'usure volumétrique peut être inférieure à 1 % en ébauche, elle peut atteindre 50 %, voire plus, en finition. [7].

II.1.2.3. Matériaux pour diélectrique

Le diélectrique est en général un liquide (l'érosion dans les gaz est extrêmement faible, à cause de l'absence de l'effet dynamique en fin de décharge). Le diélectrique doit assurer plusieurs fonctions :

- être suffisamment isolant pour s'opposer au passage massif de la décharge ;
- être capable de devenir conducteur localement pour laisser passer la décharge et la concentrer sur une petite surface ;
- permettre l'évacuation des particules érodées ;
- participer à l'évacuation de l'énergie thermique produite.

De plus, il doit assurer ces fonctions dans le temps et, donc, ne pas se dégrader trop vite. Enfin, il ne doit pas être agressif envers l'opérateur et la machine. Les fluides utilisés sont : [7].

- des hydrocarbures ;
- des huiles minérales ;
- des produits de synthèse ;
- des solutions aqueuses ;
- l'eau désionisée.

II.2. Métallurgie des poudres et frittage [8].

II.2.1. Introduction

Contrairement aux procédés de la métallurgie classique, qui font toujours intervenir la solidification d'un métal fondu, la métallurgie des poudres part d'une **poudre métallique** et utilise un procédé de consolidation appelé frittage. Celui-ci peut être défini comme une réaction entre particules d'une masse de poudre qui entraîne la formation d'un solide continu cohérent.

Le frittage n'est pas spécifique de la métallurgie des poudres, il est utilisé depuis des temps immémoriaux par les céramistes qui ont largement précédé les métallurgistes. Dans les fabrications qui sont les plus importantes en tonnage, la filière comprend trois opérations essentielles :

- **l'élaboration de poudres** métalliques compressibles ; les poudres peuvent être des métaux purs ou des alliages, elles peuvent être mélangées entre elles ou à d'autres poudres, des non-métaux ou des composés métalliques tels que les

oxydes ou les carbures ; le mélange comprend, en outre, une faible proportion d'une poudre d'un lubrifiant solide ;

- **la compression à froid** de la poudre dans des outillages qui donne une pièce agglomérée, manipulable, de forme et de dimensions précises ; la pression uniaxiale est comprise entre 200 et 800 MPa ;
- **le frittage** qui consiste à chauffer les comprimés à une température élevée mais nettement inférieure à la température de fusion du métal pur ou de l'alliage obtenu ; une atmosphère contrôlée et réductrice est nécessaire dans la plupart des cas.

Dans cette filière, la forme et les dimensions des pièces ne varient que très peu et le matériau final a donc une porosité résiduelle non négligeable. Exceptionnellement, au cours du frittage, un retrait dimensionnel peut conduire à une porosité nulle.

II.2.2.Fabrication des poudres

Les poudres utilisées pour le frittage doivent respecter certaines spécifications, comme le diamètre des grains, leur forme, leur surface spécifique, leur composition. Aussi, certaines précautions doivent être prises au cours de leur fabrication.

- **Méthodes mécaniques**

Les méthodes mécaniques s'appliquent essentiellement aux poudres métalliques. La plus utilisée est le broyage à l'aide d'appareils à marteaux ou à boulets. Si le métal est fragile, il est aisément brisé en petits granules. Les temps de broyage sont généralement compris entre une et cent heures au plus. Si le métal est ductile, on obtient, par concassage, de petites paillettes peu adaptées à la fabrication de pièces par la métallurgie des poudres (exception faite de certains produits particuliers comme l'aluminium S.A.P.).

- **Méthodes chimiques**

Les méthodes chimiques sont utilisables pour un grand nombre de métaux. La plus employée est la réduction d'un composé (généralement un oxyde, plus rarement un sulfure ou un chlorure) par un agent chimique (gaz, liquide ou solide) qui fractionne le composé en métal à l'état de fins granules et en un sous-produit qui peut être éliminé. Si le composé métallique initial est un solide, la dimension des granules du métal résultant dépend fortement de la morphologie du composé de départ. Quand le sous-produit de la réduction est gazeux, son élimination s'effectue directement par le gaz porteur ou à l'aide d'une installation à vide. La réduction de l'oxyde de cuivre par l'hydrogène (à 350 °C) en cuivre métallique et vapeur d'eau en est un exemple. Le sous-produit peut être aussi un solide ou un liquide qui se solidifie au cours du refroidissement depuis la température de réduction, comme dans le cas de la réduction du tétrachlorure de titane par le magnésium à 900 °C ; le chlorure de magnésium fondu se solidifie entre les particules de titane et peut être soit dissous, à l'aide d'une solution d'acide dilué, soit fondu et distillé sous vide.



II.2.3. Théorie du frittage

Le but du frittage est d'obtenir à partir des poudres un solide plus ou moins dense sans passer par l'état liquide (frittage d'une poudre de nature donnée), ou en maintenant à l'état solide au moins un des constituants du système (frittage en phase liquide d'un mélange de poudres). Dans le cas d'un frittage en phase solide, l'écart entre la température de traitement et la température de fusion est le plus souvent supérieur à 0,25 fois cette dernière. Le phénomène du frittage est influencé par de nombreux facteurs : caractéristiques propres des poudres (morphologie, dimensions, pureté...), conditions du traitement thermique (température, durée, pression...) et atmosphère de traitement (vide, atmosphères protectrices diverses...).

II.2.3.1. Frittage en phase solide

La thermodynamique montre que, ce processus étant irréversible, l'enthalpie libre du système doit diminuer au cours de son évolution. Cette diminution résulte essentiellement d'une réduction de l'énergie de surface (surface libre des particules, puis surface des pores). On peut diviser le processus en deux stades : il y a d'abord formation de zones de raccordement, appelées « ponts » de soudure ou « cous », entre particules en contact, puis disparition progressive de la porosité résiduelle.

II.2.3.2. Frittage en phase liquide

Dans le cas du frittage en phase liquide, l'aggloméré de départ est en réalité un mélange d'une poudre à haut point de fusion et d'assez fine granulométrie avec une poudre à plus bas point de fusion et de granulométrie quelconque. De nombreux phénomènes interviennent : diffusion en phase liquide, mouillage, remplissage des pores par la phase liquide, frittage entre particules solides en contact mutuel.

Si l'on suppose que le mouillage est parfait, lorsqu'on arrive à la température où l'un des deux éléments du système commence à fondre, les interfaces solide-gaz disparaissent. Ou bien les gaz enfermés primitivement dans les pores lors de la compression sont chassés vers l'extérieur, et il ne reste plus de pores à l'intérieur du compact, ou bien, et c'est le cas le plus probable, les gaz occlus constituent des bulles qui persistent plus ou moins longtemps dans le liquide. La pression interne qui règne dans ces bulles atteint une valeur considérable et crée une pression hydrostatique dans l'ensemble, permettant un déplacement des particules solides dans le liquide.

II.2.4. Avantages

- Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, précises et saines, qui peuvent être utilisées à l'état brut ;
- La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants ;
- Autorise l'obtention de nouveaux alliages (encore appelés dans ce cas « pseudoalliages »).

II.2.5. Inconvénients :

- La porosité naturelle peut devenir un inconvénient dans le cas de problèmes d'étanchéité par exemple ;
- Le principe de la compression conduit à des pièces non homogènes (porosité plus élevée au milieu), et dont les qualités de résistance mécanique sont faibles pour les métaux frittés.

II.2. L'usinage photochimique

II.2.1. Généralités

L'usinage photochimique est utilisé de manière industrielle depuis les années **50**, ce qui coïncide avec le début du développement de la photolithographie dans l'industrie du circuit imprimé. Les premières résines photosensibles ont fait leur apparition. On retrouve un premier brevet datant de **1852** décrivant le procédé d'usinage photochimique pour la gravure de cuivre à l'aide de perchlorure de fer.

II.2.2. Principe

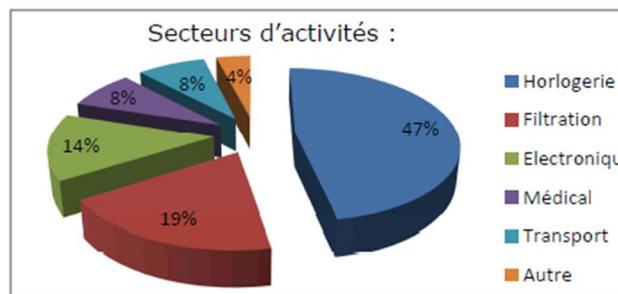
Les deux éléments principaux du procédé d'usinage photochimique sont les solutions d'attaques chimiques et les résines photosensibles (ou photorésist). De manière simplifiée, cette méthode de fabrication peut être décomposée en quatre phases :

- La préparation de surface qui consiste à optimiser la surface du matériel afin d'obtenir la meilleure adhérence avec le photorésist.
- L'opération de photolithographie.
- La phase de gravure chimique.
- Le strippage qui consiste à retirer le photorésist et assurer le nettoyage final des pièces. On retrouve, principalement dans l'industrie, deux méthodes de travail : la plus répandue est la méthode de travail en plaque et la seconde, plutôt adaptée aux très gros volumes, la méthode « reel to reel » (de rouleau à rouleau).

II.2.3. Objectifs

L'usinage photochimique permet la fabrication de pièces dans quasiment tous les métaux mais également dans certains matériaux comme par exemple le verre ou le polyimide. Mais ce sont les aciers inoxydables, les métaux ferreux et les métaux cuivreux qui représentent la majorité des productions en usinage photochimique. On utilise, principalement dans l'industrie, des panneaux de quelques microns à 2mm d'épaisseur. Appliquée à des matériaux de faibles épaisseurs (inférieures à 0.1mm) et combinée à la précision de la photolithographie, cette méthode assure la production de pièces avec des formes géométriques très complexes et aux tolérances serrées. Généralement, les tolérances données pour des pièces en usinage photochimique sont de +/- 10% de l'épaisseur du matériel usiné. [9]

II.2.4. Secteurs d'activités



II.3. Usinages LASER (Light Amplificated by Stimulated Emission of Radiation).

II.3. 1. Principe:

L'usinage laser utilise la lumière focalisée qui fond, brûle ou vaporise la matière. Ce procédé présente de nombreux avantages par rapport à la découpe mécanique : meilleure qualité de coupe, pas d'usure des outils (absence de contact) et zone usinée moins perturbée par la chaleur, ce qui minimise les déformations des pièces.

Les lasers CO₂ et Nd:YAG sont les plus répandus en fonction des matériaux traités. Les applications typiques comprennent l'usinage de matériaux en fines épaisseurs, la coupe de céramiques et de diamants et l'usinage de tubes. **Figure III.16. [10]**

L'usinage laser peut intervenir aussi bien sur de nombreux métaux que sur les substances ou matériaux non métalliques, tels que tissus, plastiques, bois (contre-plaqué), etc. Avec les possibilités suivantes:

- ❖ découpe jusqu'à 10mm d'épaisseur maxi.
- ❖ puissance de 20 à 25kW dans l'industrie (contre quelques mW dans le médical).
- ❖ Possibilité d'usiner dans des zones difficiles d'accès.
- ❖ soudage de matériaux différents.
- ❖ mauvais rendement (20%).
- ❖ nécessite des protections importantes.

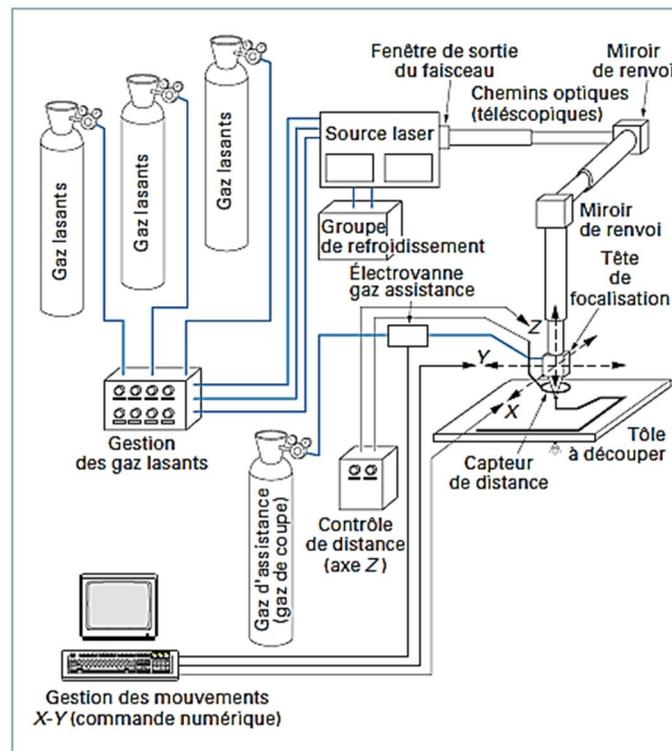


Figure II.3. Schéma de principe d'une installation de coupe laser CO₂ . [10].

II.4. Formage par explosion

II.4. 1.Principe

Produite par l'huile comprimée mécaniquement, Seule la poudre et ses dérivés constituent de donner au métal (sous forme de tôle ou plaque) , la forme de la coquille de laquelle on provoque une explosion. Le plus souvent il s'agit d'une coquille femelle et le procédé rassemble en quelque sorte à un emboutissage, mais comme il est possible de mettre en forme, autour d'un modèle male, le procédé s'apparente plutôt à un repoussage. L'onde de choc engendrée par la déflagration de l'explosif est transmise au métal par un liquide qui est souvent de l'eau.

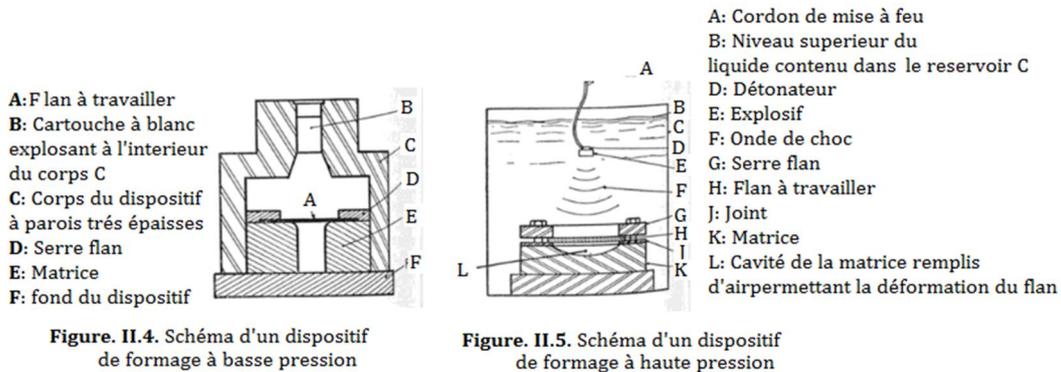
Les poudres utilisées sont:

- Poudre de chasse
- Trinitrotoluène(TNT)
- Cyclonite(RDX)
- Pentacrythritol tetranitrate(PETN)
- Le tritonol

Ces poudres sont utilisées sous forme de grains, feuilles, bâtons, boulettes et cordons

La pression engendrée peut être de quelques Kilogrammes à mille kilogrammes par centimètre carré.

Les **figures II.4** et **II.5**. Schématisent les deux procédés de formage à basse et haute pression.



II.4. 2. Avantages

- Possibilité de formage des matériaux peu ductiles et l'obtention de formes compliquées
- Frais d'investissement et outillage peu élevés
- Economie des travaux
- Grande exactitude des formes réalisées
- Faibles élasticité résiduelle.

II.4. 3. Inconvénients

- Procédés économiques seulement dans le cas de petites séries
- Difficultés pour définir les déroulements des opérations de formage
- Nécessite de locaux ou d'équipements spéciaux pour la mise en œuvre de ces procédés
- Difficultés de stockage et de manipulation des explosifs
- Guère de possibilité de combinaison avec d'autres procédés

II.5. Formage par électromagnétique

Dans ce procédé l'énergie électrique est libérée par des condensateurs, dans une bobine en quelques microsecondes. Un flux magnétique très intense est créé dans l'enroulement de la bobine. Si une pièce en métal conducteur est placée dans le champ magnétique, les courants induits dans le métal engendrent une force qui déforme la pièce (force de Laplace).

Puisque les bobines ont généralement une section circulaire, ce procédé est surtout appliqué pour le formage des tubes ou des pièces tubulaires.

La déformation peut être faite :

- Par retrait : la pièce est située à l'intérieur de la bobine.
- Par expansion : la bobine est située à l'intérieur de la pièce. [11]

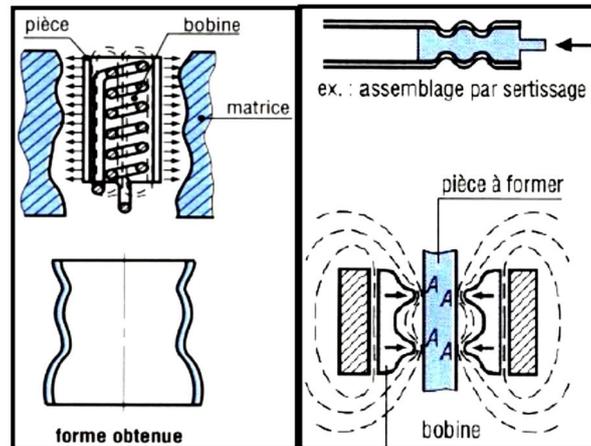


Figure.II.6. Formage par électromagnétique [11].

II.6. Formage par électro- hydraulique

Un courant de forte intensité et de courte durée est appliqué aux bornes de deux électrodes.

La décharge électrique forme une bulle de gaz qui se développe au sein du liquide en générant une onde de chocs violente, semblable à celle obtenue par la détonation d'explosif sous l'eau.

L'énergie cinétique acquise par le fluide suffit à conformer la pièce métallique au profil de la matrice. [11].

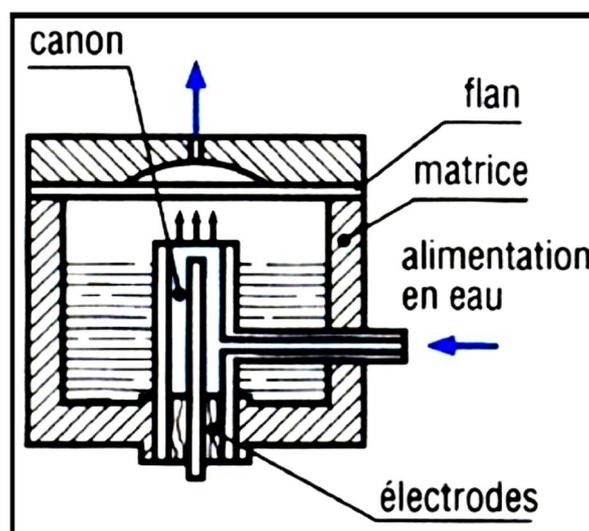


Figure II.7. Formage par électro-hydraulique.

Références

[1]: Mise en forme des métaux, Aspects mécaniques et thermiques, Eric FELDER, M 3000 v2, Techniques de l'ingénieur, 2015.

**Cours Techniques de Fabrication Mécanique Conventionnelles et Avancée,
M1 Construction mécanique, Université de M'sila
Dr: Debih Ali**

- [2]:** Industrie de la fonderie, Pierre CUENIN, M 3 500, Techniques de l'ingénieur, 1994.
- [3]:** Moulage – Noyautage, Pierre CUENIN, Techniques de l'ingénieur, M3512, 1994.
- [4]:** Gilles DOUR, « Fonderie alliages, procédés, propriétés d'usage, défauts », Editeur Dunod 2004, France.
- [5]:** C. Marty, J.M Linares, « Procédés de mise en forme T 3» Hermès Science, Paris 1999, France.
- [6]:** M'HEMED SAMIR, Support de cours techniques de production, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul, 2004-2005.
- [7]:** Usinage par électroérosion, Daniel KREMER, techniques de l'ingénieur, BM 5271,2000.
- [8]:** Métallurgie des poudres, Généralités, Michel EUDIER, Techniques de l'ingénieur; M860, 1994.
- [9]:** Usinage photochimique, Julien Duville, CMT Rickenbach SA, 2017.
- [10]:** Coupage thermique et coupage au jet d'eau, Gilles CANNET et Michel DELZENNE, Techniques de l'ingénieur, BM 7 280, 1998.
- [11]:** Support de cours, Procédés de mise en forme, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul, 2017.