

Chapitre 4 : Procédés non conventionnels 3 semaines

Généralités, Différentes techniques d'usinage (Electro érosion, Electrochimique, Ultrason, Bombardement électronique, Laser), Avantages.

Chapitre IV : Procédés non conventionnels

IV.1. Généralités

On parlera d'usinages non conventionnels en référence à des usinages ne faisant pas appel à la « coupe des métaux ». Par contre aux procédés conventionnels qui mettent en jeu, pour l'enlèvement de copeaux, des efforts de coupe importants, deviennent difficiles pour l'usinage des matériaux durs ne permettent pas l'obtention des formes complexes. Les procédés d'usinage non conventionnels ne nécessitent pratiquement aucun effort de coupe, mais leurs débits de matière enlevée est très faible comparativement au dédit de tournage par exemple. Cependant dans certains cas, seuls les usinages modernes peuvent être envisagés (par exemple, usinage des pièces de faibles dimensions, ou pièces très dures). Ces procédés comportent:

- Le procédé d'usinage par électroérosion repose sur le fait que l'étincelle électrique éclatant entre deux conducteurs séparés par un fluide diélectrique produit une érosion préférentielle de l'anode, du fait d'un échauffement intense entraînant fusion et vaporisation. La cathode confère ainsi peu à peu sa forme à l'anode.
Une variante très utilisée pour découper des pièces en plaques consiste à utiliser comme cathode un fil (découpe par électroérosion à fil). C'est actuellement le plus important des procédés physicochimiques, car il permet, pour un coût raisonnable, l'usinage de matériaux métalliques très utilisés, mais de très faible usinabilité pour les procédés de coupe comme les matériaux à outils ou la réalisation de formes très complexes (moules de fonderie ou d'injection).
- L'usinage par jet fluide met en jeu des fluides de natures diverses :
 - ❖ flamme d'un chalumeau en oxycoupage ;
 - ❖ gaz ionisé d'un plasma ;
 - ❖ faisceau de lumière cohérente du laser ;
 - ❖ faisceau d'électrons en bombardement électronique (plus rare).

Dans tous les cas, l'impact du jet chauffe fortement la pièce, permettant le perçage ou la découpe de matériaux en feuilles ou plaques plus ou moins épaisses.

L'impact d'un jet d'eau à grande vitesse permet de réaliser des opérations similaires sur des matériaux peu consistants comme les tissus ou le papier, l'addition de particules abrasives permettant l'usinage des matériaux plus durs et/ou fragiles comme les métaux ou les céramiques.

IV.2. Principe d'usinage par électroérosion

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 III.10**). On observe trois phases : (**figure III.11**)

- **l'initiation de la décharge**, appelée phase d'ionisation; 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 12000 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**: 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:** 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. 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 [28] et laisse un cratère sur chaque électrode. La partie de métal fondu non arrachée solidifie sur place. [17]

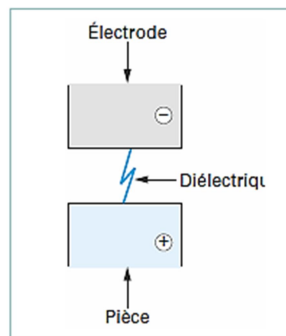


Figure III.10. Principe de l'électroérosion [17].

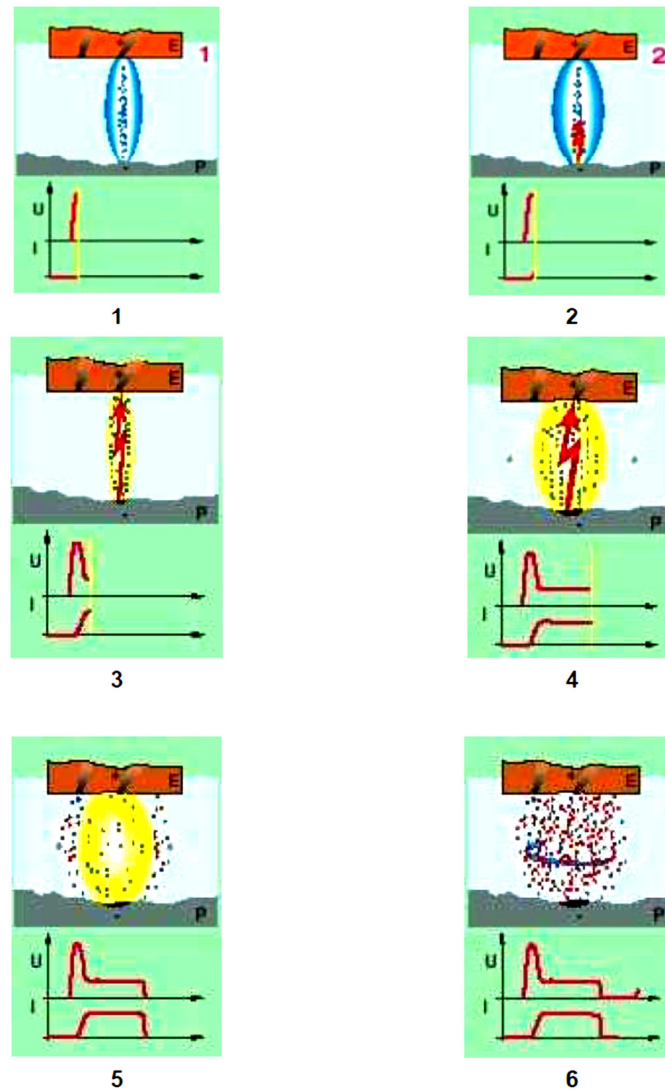


Figure III.11. Schéma du déroulement d'une étincelle.

IV.3. Usinage par ultrasons ou (usinage par abrasion ultrasonore)

L'usinage abrasif ultrasonore consiste à projeter des particules abrasives très dures sur la pièce à usiner, à l'aide d'une sonotrode vibrant à fréquence ultrasonore (20 kHz ou plus). Les particules sont amenées dans la zone de travail par un fluide porteur, de l'eau en général (**figure III.12**). La matière est enlevée par le cisaillement, l'érosion et l'abrasion provoqués par les grains abrasifs. Cette action se traduit par un enlèvement de matière sur la pièce, une usure de la sonotrode et une usure des grains.

Deux mécanismes principaux sont reconnus pour l'enlèvement de la matière:

- une action mécanique due à la projection et au martèlement des grains abrasifs contre la surface de la pièce ; cela rend le procédé efficace lors de l'usinage des matériaux fragiles : verres, graphites, ferrites, céramiques, composites, quartz, semi-conducteurs... ;
 - une érosion de cavitation due aux variations de pression au sein du liquide, engendrées par les vibrations de la sonotrode ; cela a un effet positif pour les matériaux fragiles et/ou poreux : graphites, céramiques poreuses...
- Bien que le procédé soit apte à usiner tous les matériaux (conducteurs ou non, métalliques, céramiques ou composites...), il est plus efficace pour les matériaux fragiles et/ou poreux.

L'usinage des matériaux ductiles peut être réalisé d'une manière plus rentable par d'autres techniques, comme la coupe, l'électroérosion ou l'électrochimie. Il n'est pas possible de prévoir avec suffisamment de précision la vitesse d'usinage, liée à un trop grand nombre de facteurs : fréquence et amplitude des

vibrations, pression statique moyenne, dimension moyenne et acuité des grains, caractéristiques mécaniques et physiques du matériau de la pièce...

Les machines sont conçues pour que l'avance de la sonotrode outil ait lieu au fur et à mesure que la matière est enlevée. Les premières machines utilisaient des systèmes à contre-poids, la charge statique étant réglée manuellement. Les machines actuelles utilisent un asservissement en effort, avec mesure de la force statique à l'aide de capteurs, ce qui permet de régler celle-ci avec une plus grande précision et de la moduler en fonction de la position en cours d'usinage : elle peut être faible à l'attaque, pour permettre aux grains de commencer à creuser l'empreinte, puis augmentée à sa valeur optimale choisie pour poursuivre l'usinage, diminuée à la fin de l'opération, par exemple dans le cas d'un perçage, afin d'éviter ou de minimiser le phénomène d'écaillage à la sortie. [18]

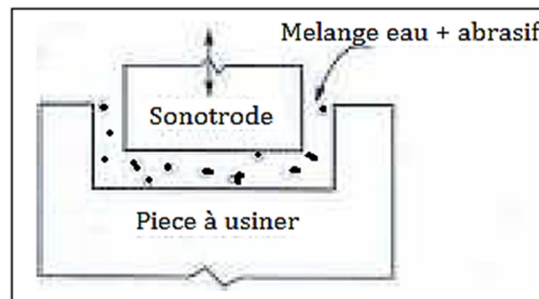


Figure III.12. Principe de l'abrasion ultrasonore, [18].

Le procédé peut être caractérisé par trois critères principaux :

- débit de matière ;
- usure relative de la sonotrode ;
- état de surface.

Les performances dépendent essentiellement du matériau à usiner, du matériau de la sonotrode et du matériau des grains abrasifs, mais aussi d'autres paramètres.

■ **Matériaux et usinabilité:** Les matériaux répondent différemment au procédé, et ce en fonction de leurs caractéristiques physiques ou mécaniques telles que dureté, fragilité, porosité. Il est possible de les classer en trois catégories.

La première catégorie : comprend les matériaux qui conviennent particulièrement bien au procédé : ils sont très fragiles ou très poreux, tels que verre, graphite, germanium, silicium... De grands débits de matière peuvent être obtenus (jusqu'à quelques centaines de mm^3/min), avec une très faible usure de la sonotrode (1 % pour le verre, moins de 1 % pour le graphite). L'usinage par ultrasons est très économique pour ces matériaux.

La deuxième catégorie: concerne des matériaux qui sont plus difficiles à usiner, car ils sont moins fragiles et moins poreux (céramiques, carbures, nitrures, pierres précieuses...). Ils conduisent à un débit plus faible (quelques dizaines de mm^3/min) et à une usure de sonotrode plus marquée (de 2 % pour la silice à 10 % pour le rubis).

Ces matériaux peuvent être usinés par ultrasons lorsque les autres procédés ne sont pas adaptés.

La troisième catégorie: englobe les matériaux qui ne répondent pas bien au principe. De faibles débits de matière sont obtenus (quelques mm^3/min) et une usure de sonotrode importante est observée : de 30 % pour le Sialon (céramique) à 100 % pour les aciers.

Pour ces matériaux, l'usinage par ultrasons est utilisé dans des cas particuliers : perçage fin ou défonceage de forme complexe dans une céramique très dure (nitrure de silicium par exemple), perçage d'acier trempé sans affectation thermique de la matière.

IV.4. Usinage chimique

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

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

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

La gravure chimique remonte au 1er millénaire, chez les Arabes, qui utilisaient l'action du sel de nitre (nitrate de sodium) sur les métaux. Au XVIe siècle, l'utilisation de bitume de Judée, déposé et séché sur une plaque de cuivre ou d'acier, permet à l'artiste de dessiner avec une pointe sèche, dégageant ainsi le métal, que l'on attaque ensuite à l'acide nitrique : c'est la gravure à l'eau forte.

Cette technique fut utilisée pour la réalisation de plaques décoratives et de clichés d'imprimerie, pour la reproduction de dessins.

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

- la découpe chimique, enlevant localement le métal sur toute l'épaisseur de la pièce ; les applications sont extrêmement nombreuses, tout particulièrement en électronique (**figure III.13A**) et en mécanique ; ce procédé est utilisé pour obtenir des pièces plates de dimensions variées (de 1 mm² à 1 m²) à partir de feuilles ou de plaques d'épaisseur assez faible (10 µm à 3 mm) ;
- le fraisage chimique, créant des creux dans des surfaces ; les applications sont dans l'imprimerie (héliogravure) et surtout dans l'usinage de pièces importantes employées dans la construction aéronautique (**figure III.13B**) : éléments de voilures ou de fuselage (plusieurs mètres carrés), dans un but d'allègement des structures.

L'usinage chimique offre, entre autres, l'avantage de ne pas modifier les propriétés mécaniques et métallurgiques des métaux : une pièce en acier trempé ou recuit reste en son état. [19].

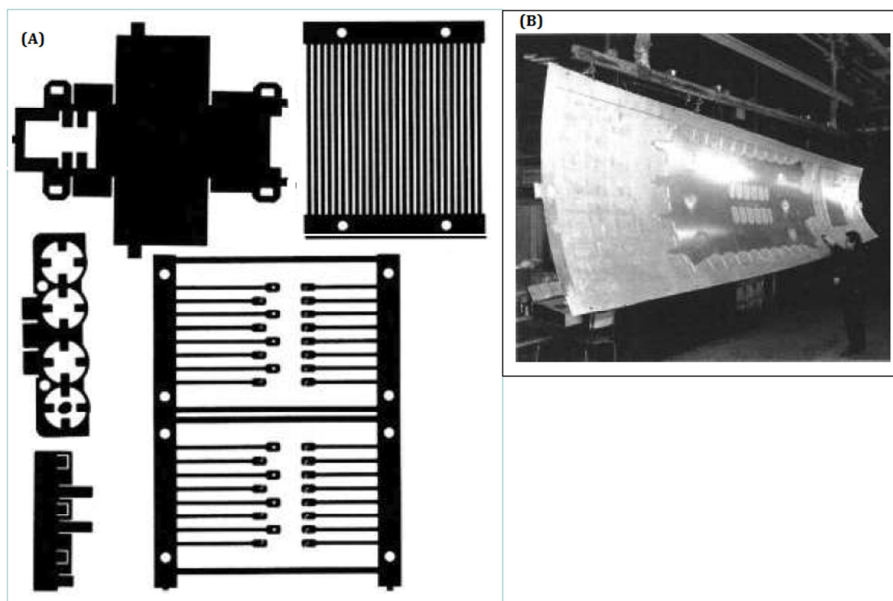


Figure III.13. (A) Pièces électroniques obtenues par découpe chimique, (B) Pièces aéronautiques obtenues par fraisage chimique. [19].

IV.5. Usinage électrochimique

Principe du procédé basé sur les lois générales de l'électrolyse. Dans une cellule électrolytique (**figure III.14**), 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. [20]

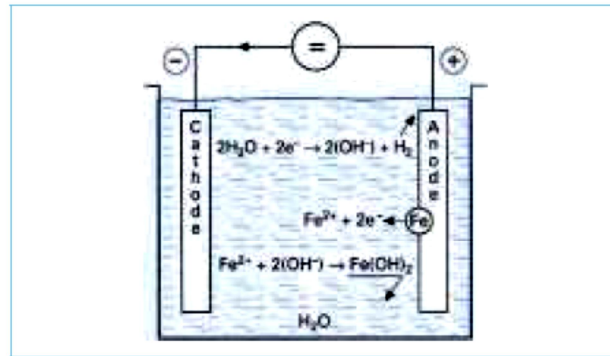


Figure III.14. Schéma d'une cellule électrolytique, [20].

IV.6. Usinage au jet d'eau

L'usinage thermique est basé sur la fusion ponctuelle du matériau à découper (sur toute l'épaisseur) et sur le déplacement du front de fusion selon une trajectoire qui définit la forme de la découpe.

L'usinage au jet d'eau n'est pas basé sur la fusion et ne saurait être qualifié de coupage thermique, comme nous le verrons, mais il est fréquemment associé à ces procédés par le fait qu'il est aussi basé sur le déplacement d'un point d'impact et qu'il est donc mis en oeuvre par des moyens assez similaires et sur un certain nombre d'applications proches.

Les usinages thermique et au jet d'eau se distinguent des procédés dits « mécaniques » par l'absence de contact et de réaction pièce/outil. Les procédés dits « mécaniques » sont généralement basés sur des phénomènes de cisaillement de la matière (poinçonnage à la presse, coupage à la cisaille) ou d'arrachement de matière (tronçonnage à la meule ou à l'outil).

Le principe consiste à mettre en oeuvre un « simple » jet d'eau très fin (quelques dixièmes de millimètre de diamètre), mais animé d'une vitesse très élevée résultant de la très haute pression d'injection, soit 3×10^6 à 5×10^6 hPa (3 000 à 5 000 bar). L'énergie cinétique de ce jet est alors susceptible d'exécuter de fines saignées sur des produits très divers. Cette action cinétique de l'eau pure est souvent renforcée - pour le coupage de métaux ou alliages très durs - par l'addition de produits abrasifs dans l'eau.

L'outil de mise en oeuvre est constitué par une buse en matériau très dur (en général, en saphir) alimentée par un générateur d'eau à très haute pression.

La figure III. 15 présente le schéma de principe d'une installation de coupage au jet d'eau.

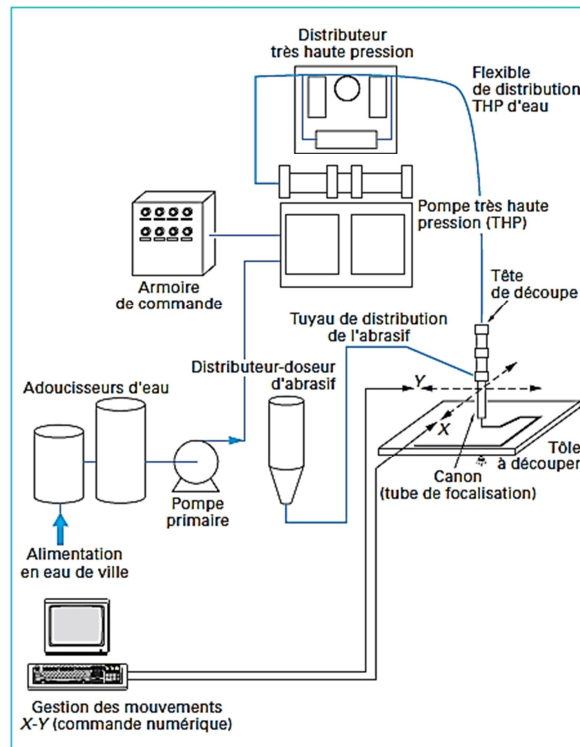


Figure III.15. Schéma de principe d'une installation de coupe au jet d'eau

❖ **Avantages:**

- 1- propre.
- 2- immatériel (ne chauffe pas).
- 3- inusable et facilement réglable.
- 4- précis (quelques 1/100èmes de mm).

❖ **Inconvénients:**

- 1- limitation quant à la forme et à la profondeur de pénétration.
- 2- durée de vie des buses (200 heures sous 4000 bars).
- 3- coût de l'installation: très cher et encore autant pour la filtration et l'adoucissement de l'eau.

IV.7. Usinages LASER (Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation):

IV.7. 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. [21]**

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.

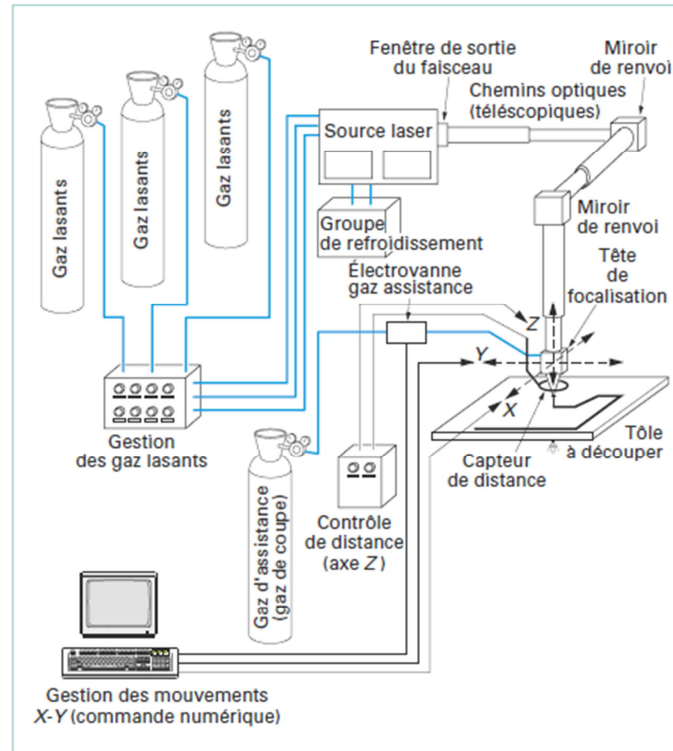


Figure III.16. Schéma de principe d'une installation de coupe laser CO₂ . [21].