

# LES SOURCES LASER

## I – TERMINOLOGIE

### QUE SIGNIFIE LE MOT LASER :

**L**ight  
**A**mplification by  
**S**timulated  
**E**mission of  
**R**adiation

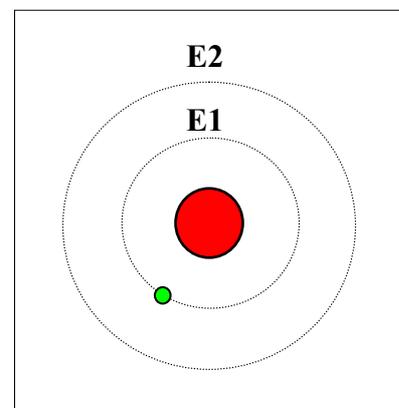
C'est à dire :

**Amplification de Lumière par Emission Stimulée de Radiation**

## II - PRINCIPE DE L'EMISSION LASER

### ETAT FONDAMENTAL DE L'ATOME

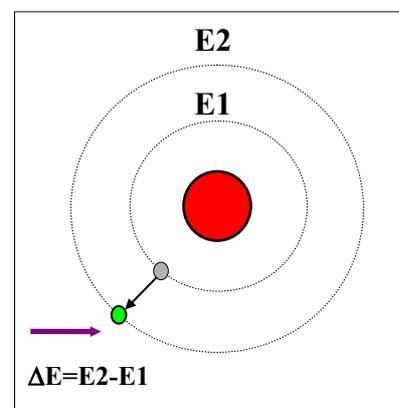
Les atomes sont constitués d'un noyau et d'un ou plusieurs électrons qui gravitent sur des orbites stables.



### POMPAGE PAR EXCITATION ( ABSORPTION)

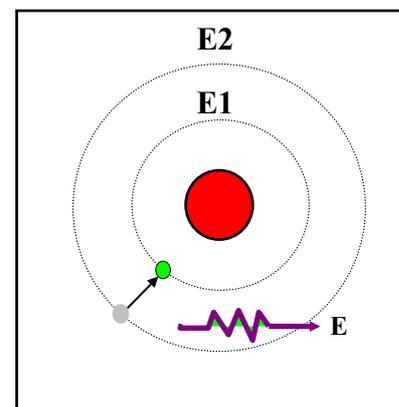
Le passage d'un électron d'une orbite de niveau d'énergie E1 à une autre orbite de niveau d'énergie E2 se fait par absorption d'une quantité d'énergie parfaitement définie, qui peut provenir d'une excitation électrique ou électro-magnétique (Flash lumineux ou rayon laser)

( $E = E_2 - E_1 = h\nu$  -Loi de Planck)



### EMISSION SPONTANEE

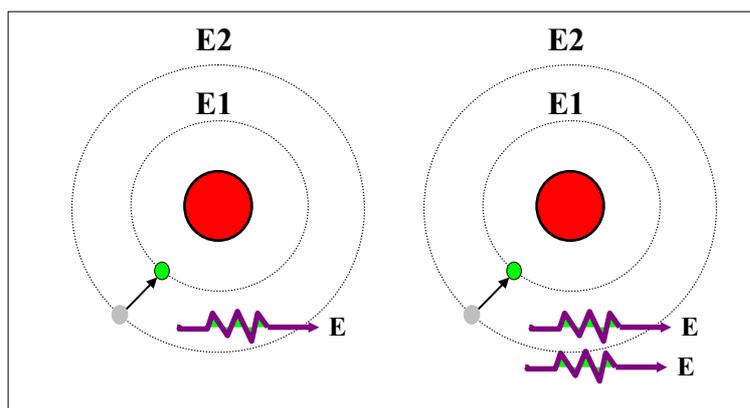
Lorsque un électron est situé à un niveau excité, il revient Naturellement à son état fondamental en libérant un photon d'énergie  $E = h\nu$  ; c'est l'émission spontanée.



### EMISSION STIMULEE

Lorsqu'un photon d'énergie  $E = h\nu$ , excite un électron placé sur une orbite supérieure E2, il y a libération d'énergie sous la forme d'un second photon de même énergie et de même phase que le photon incident.

Il y a émission stimulée.



### III - REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE SOURCE LASER

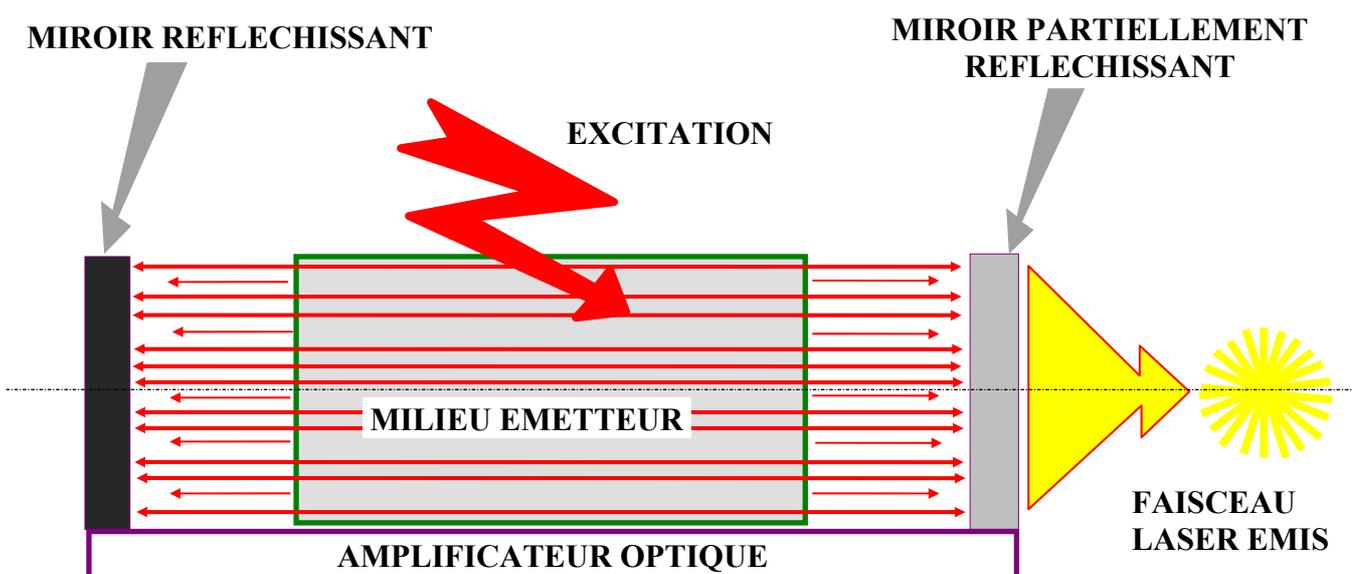
Tout laser comporte les éléments suivants :

- **Un milieu émetteur.**
- **Une source d'excitation.**
- **Une amplification (Résonateur optique).**

Le milieu actif est placé dans un résonateur constitué de deux miroirs dont l'un est partiellement transparent. Ce milieu actif subit une excitation afin d'obtenir le phénomène de « pompage ».

Lorsque le niveau d'énergie supérieur devient plus peuplé que le niveau inférieur, il y a inversion de population et émission spontanée dans toutes les directions. L'amplification est obtenue suivant l'axe optique de la cavité, par réflexions multiples de la lumière sur les deux miroirs formant la cavité résonnante.

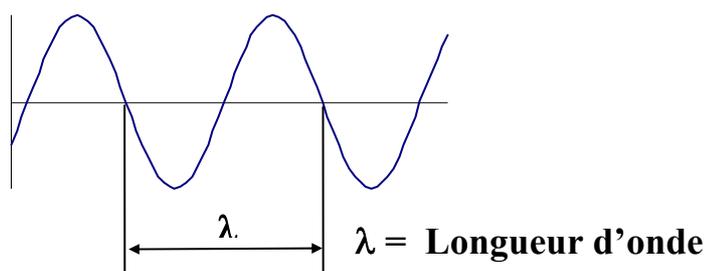
Le faisceau sort de la cavité à travers le miroir partiellement transparent .



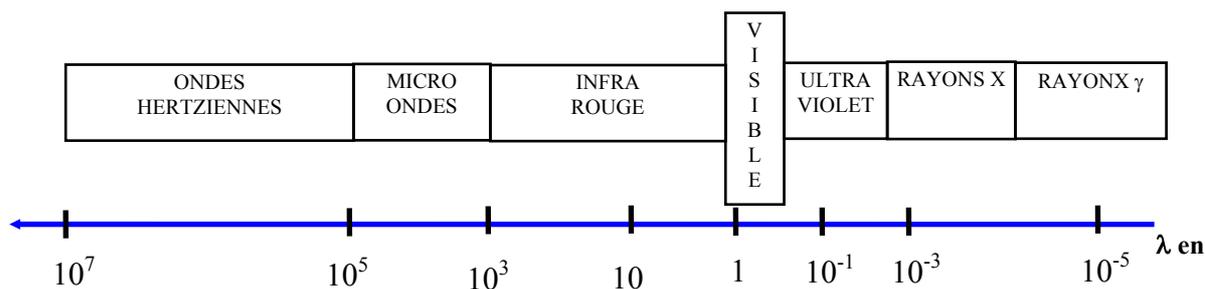
## IV - CARACTERISTIQUES D'UN FAISCEAU LASER

### 4.1 - Monochromaticité.

Le laser n'émet qu'à une seule longueur d'onde qui dépend de la nature du milieu émetteur. La longueur d'onde est importante car l'absorption des matériaux varie selon la valeur de celle-ci. Certains matériaux se travailleront donc mieux avec un laser plutôt qu'un autre.



### LES RAYONNEMENTS ELECTRO-MAGNETIQUES



**Nota : Domaine visible = Focalisation sur la rétine par l'oeil humain**

### 4.2 – Faible divergence.



Une source lumineuse classique émet de la lumière dans toutes les directions de l'espace.

Une importante propriété du laser est sa **directivité** :

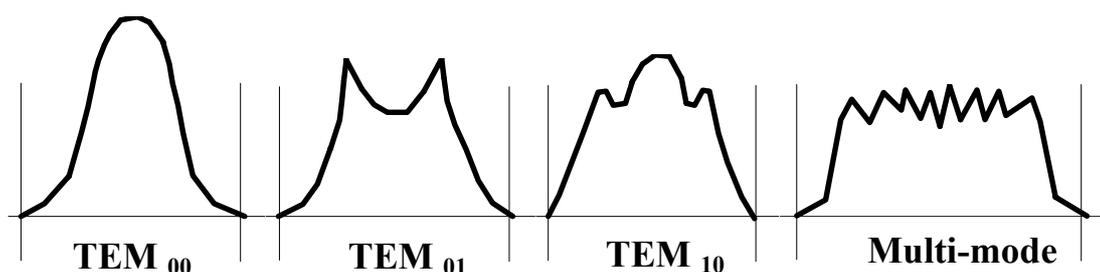
**Le faisceau est émis avec un très faible angle de divergence.**

Pour les lasers industriels, la divergence est de l'ordre de 1 à 3 mrad.

A titre d'exemple, à 2 mrad, un faisceau laser voit son diamètre augmenter de 2 mm sur une distance de propagation de 1 m.

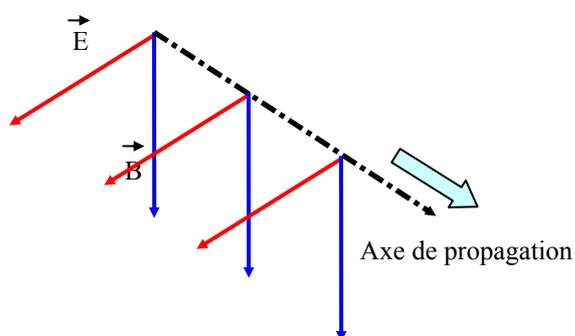
### 4.3 – Mode transverse.

Le mode transverse caractérise la répartition de puissance selon une coupe transversale du faisceau. Un faisceau laser de qualité optique parfaite aura une répartition dite  $TEM_{00}$ . (T.E.M. voulant dire : « Transverse Electric Magnétique »). Cette répartition, souvent appelée Gaussienne, est le mode idéal pour la découpe, cependant en soudage on trouvera des lasers fonctionnant avec des modes allant du  $TEM_{00}$  au multi-mode.

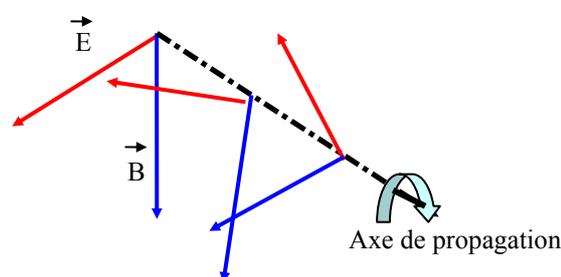


### 4.4 – Polarisation.

Le rayonnement laser est une onde électro-magnétique pouvant se décomposer en un vecteur champ électrique  $\mathbf{E}$  et un vecteur champ magnétique  $\mathbf{B}$  perpendiculaire à  $\mathbf{E}$ . Les lasers industriels utilisés en découpe sont très souvent polarisés linéairement. Schématiquement cela veut dire que la direction du champ électrique est constamment la même sur l'axe de propagation du faisceau. Dans le cas de la polarisation circulaire, ce vecteur tourne autour de l'axe de propagation. ~~propagation~~ Cependant à la découpe, la polarisation n'exerce pas une action prépondérante sur la qualité du soudage. Cependant il a été constaté qu'elle peut améliorer les performances dans le cas de soudage à grande vitesse.



**POLARISATION LINEAIRE**



**POLARISATION CIRCULAIRE**

## V – LES SOURCES LASER INDUSTRIELLES.

La classification des sources laser est effectuée en fonction :

- de la nature du milieu émetteur
- du type d'excitation
- du type d'amplificateur (cavité).

### 5.1- Les lasers à solide Nd: YAG ( Yttrium Aluminium Grenat)

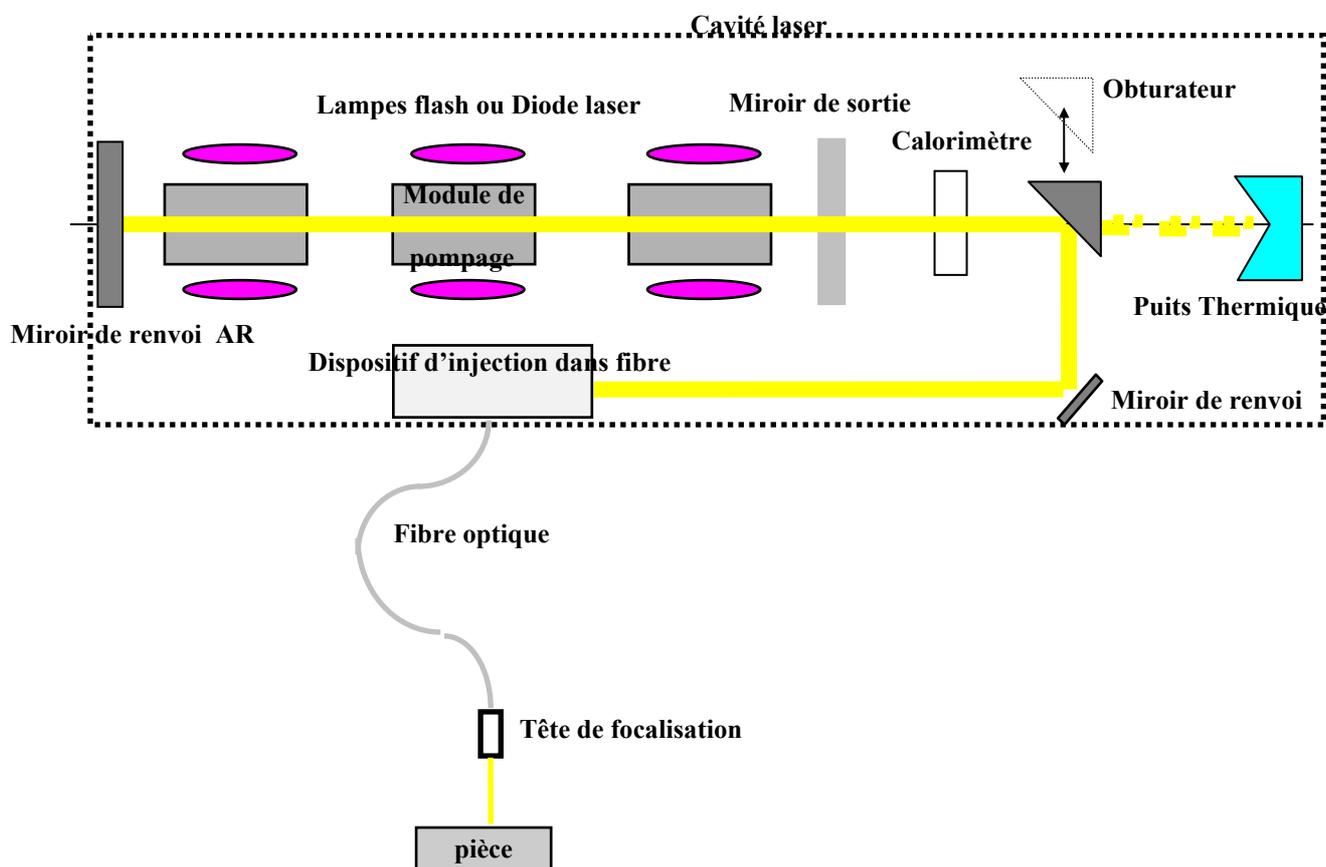
Longueur d'onde : 1,06  $\mu\text{m}$  (Domaine visible  $\rightarrow$  Focalisation par l'œil humain)

Le milieu émetteur est constitué de barreaux (ou de disques) en silicate double d'aluminium et yttrium dopé au néodyme ( $\text{Nd}^{++}$ ).

#### - Les lasers Nd: YAG continus.

Chaque barreau est excité par une ou deux lampes flash ou diodes laser émettant « en continu », l'ensemble constituant la chambre de pompage. Il est possible d'assembler plusieurs « chambre de pompage » pour obtenir une puissance de l'ordre de 5 kW. L'utilisation de diodes laser en remplacement des lampes flash augmente la disponibilité mais font toujours de la technologie YAG une solution coûteuse.

L'amplification se fait par aller et retour entre un miroir réfléchissant et un miroir de sortie semi-réfléchissant. Le faisceau émis est transporté par des miroirs ou par des fibres optiques de diamètre allant de 0,3 à 1mm. Les lasers YAG continus peuvent être utilisés en mode pulsé mais avec des puissances de crête limitée (environ deux fois la puissance moyenne).



### - Les lasers Nd: YAG Pulsés.

Le résonateur et les chambres de pompage sont de conception similaire à celles des lasers continus. L'excitation s'effectue de façon différente. Les lampes flash sont alimentées à des fréquences et durées d'impulsion variables, parfaitement définies et reproductibles dans le temps. A chaque impulsion électrique correspond l'émission d'une impulsion laser. Un pilotage de l'excitation des lampes flash permet de contrôler le profil temporel de l'énergie émise par l'impulsion laser. Un module de pompage permet la production d'une énergie laser de l'ordre de 50 joules pour une puissance moyenne de 500 watts et des puissances de crête pouvant aller jusqu'à 25 kw. La puissance crête et la durée de l'impulsion sont liées par la relation :

$$P_{\text{crête}} = E / t$$

$P_{\text{crête}}$  = Puissance crête en Watts,  $E$  = énergie par impulsion en joules,  $t$  = durée d'impulsion en secondes

De même la puissance moyenne et la fréquence sont liées par la relation :

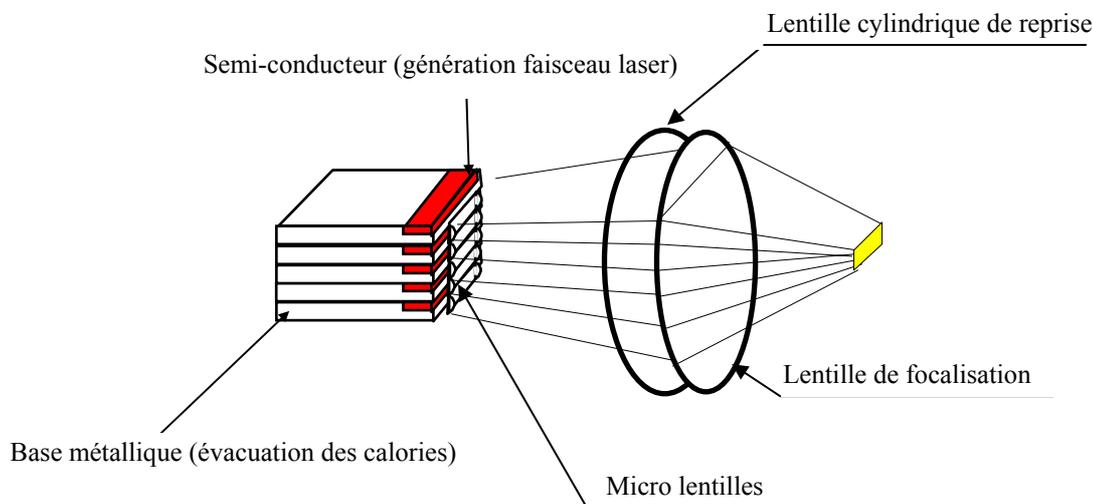
$$P_m = E \times f$$

$P_m$  = puissance moyenne en Watt,  $E$  = énergie par impulsion en joules,  $f$  = fréquence d'impulsion en Hertz

## 5.2 - Les Diodes laser.

Longueur d'onde : 0,808 et 0,940  $\mu\text{m}$  (Domaine visible  $\rightarrow$  Focalisation par l'œil humain)

Les lasers à diodes sont constitués d'un empilage de diodes issues de l'électronique des semi-conducteurs. Chaque diode émet un faisceau de puissance maximale 20 à 50 W traité optiquement par une lentille de faibles dimensions. Un jeu de lentille traite l'ensemble des faisceaux élémentaires pour donner une tache focale rectangulaire de quelques dixièmes de mm de large sur quelques mm de long.



### 5.3 - Les lasers à Gaz CO<sub>2</sub>.

Longueur d'onde : 10,6  $\mu\text{m}$  (Domaine infrarouge  $\rightarrow$  Pas de focalisation par l'œil humain)

#### - Les sources à flux Axial Rapide.

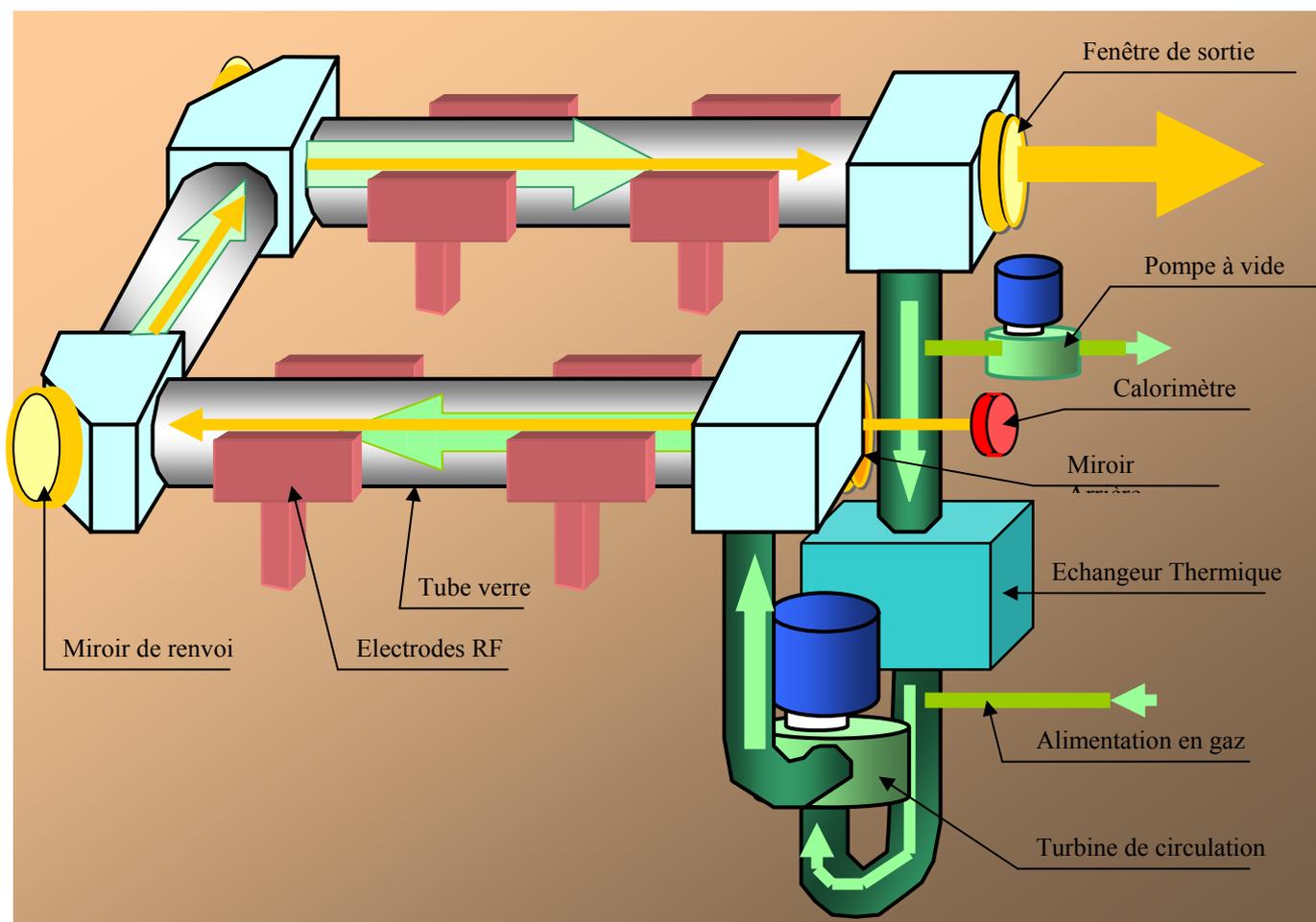
Le mélange gazeux circule à grande vitesse dans la cavité, propulsé par des pompes roots ou des turbines. Le flux gazeux et le flux de photons sont coaxiaux (axe de la cavité). Les gaz introduits dans la cavité constituée de tubes de verre ou quartz circulent axialement et traversent un échangeur thermique permettant d'évacuer les calories générées par la décharge. Une partie du mélange gazeux est évacuée par une pompe à vide et remplacée par des gaz neufs.

Le mélange gazeux est composé d'hélium (He), d'azote (N<sub>2</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

En vue de réduire le volume des sources, la cavité est repliée en U, en carré ou en étoile, sur 1 ou plusieurs niveaux.

Une partie du faisceau passe au travers du miroir semi transparent de sortie de cavité (fenêtre de sortie) et est dirigé vers le poste de travail par des miroirs fixes ou mobiles. Dans certains cas, une partie de l'énergie laser est prélevée par l'intermédiaire d'un miroir faiblement transparent de fond de cavité en vue de mesurer et de réguler l'énergie laser produite.

L'excitation est assurée par une haute tension électrique continue (électrodes dans la cavité) ou alternative radio-fréquence (électrodes extérieures à la cavité). Pour des raisons de réduction de pollution et d'étanchéité de la cavité, seule l'excitation radio-fréquence est de nos jours utilisée.



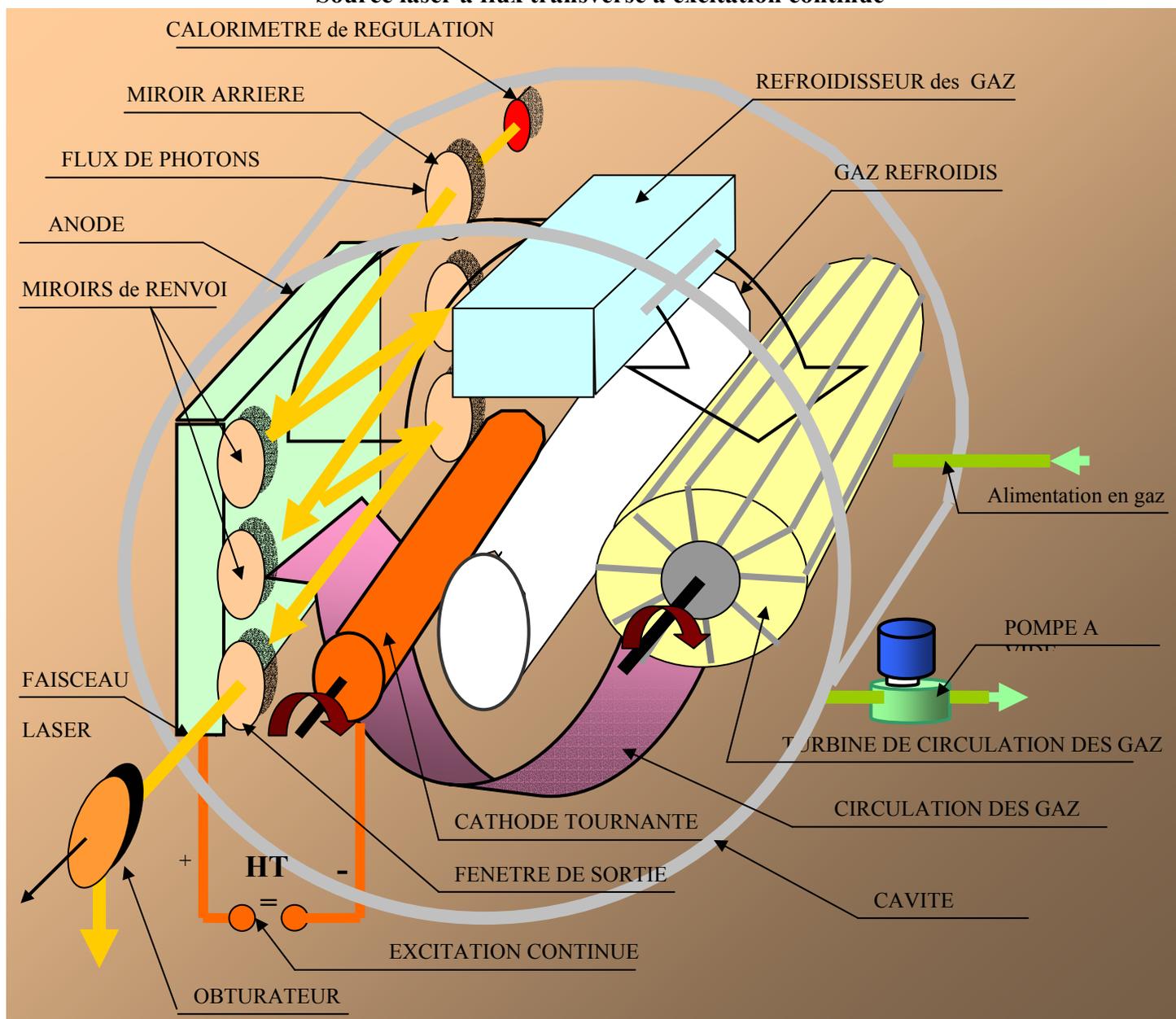
Ces sources produisent un faisceau de tendance TEM<sub>00</sub> avec un coefficient K de l'ordre de 0,6 à 0,7.

### - Les sources à flux transverse.

Dans ce type de source, la cavité cylindrique de grand volume est remplie d'un mélange gazeux à la pression absolue de 140 hPa (vide partiel). Ce mélange contient de l'azote ( $N_2$ ), de l'hélium (He) et du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Une partie des gaz sont évacués par une pompe à vide et sont remplacés par des gaz neufs. Le mélange gazeux mis en circulation par une turbine, traverse la zone de décharge puis un échangeur thermique évacuant les calories émises par cette décharge. Le flux gazeux est perpendiculaire au flux de photons du résonateur. Le faisceau laser traverse plusieurs fois la cavité de décharge par réflexions multiples sur des miroirs de renvoi. Il est extrait de la cavité par l'intermédiaire d'un miroir avant semi-transparent (fenêtre de sortie) et contrôlé en puissance par prélèvement à travers un miroir arrière partiellement transparent par un calorimètre.

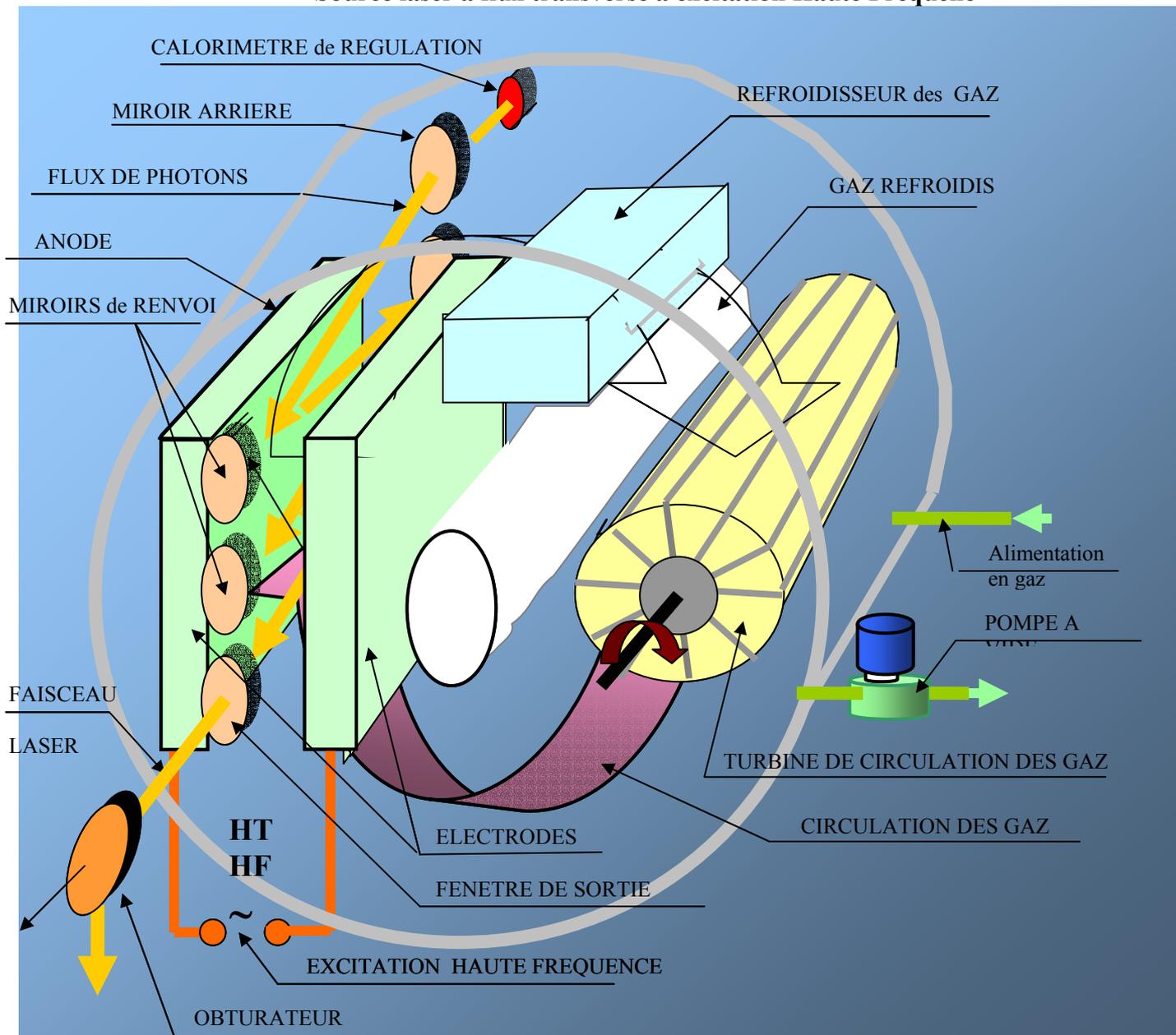
Dans les années 1980-1990, pour ce type de source, l'excitation était assurée par une haute tension continue, la décharge s'effectuant entre une plaque (anode) de grande surface et une cathode cylindrique en cuivre de surface très inférieure.

#### Source laser à flux transverse à excitation continue



. L'excès de densité de champ électrique au niveau de cette cathode entraînait une formation de suie (dépôt de carbone) imposant des ouvertures de cavité et des nettoyages très fréquents. L'encrassement de la cathode provoquait des variations de puissance et des détériorations de miroirs par leur bombardement par des particules entraînées par le flux gazeux. Des évolutions ont été introduites, addition d'oxygène ( $O_2$ ) pour brûler les suies, rotation de la cathode pour varier la zone active, mais la fréquence de nettoyage restait importante (toutes les 400 à 500 h). La perte de compétitivité en exploitation industrielle de ce type de source par rapport aux sources flux axial rapide a conduit au remplacement de l'excitation continue par une excitation haute tension et haute fréquence (de l'ordre de 20 MHz).

### Source laser à flux transverse à excitation Haute Fréquence



Dans cette solution apparue en 1995, la décharge s'effectue entre deux électrodes de même surface, celles-ci n'étant plus en contact avec les gaz car noyées dans de la céramique. Ce dispositif a éliminé les interventions pour nettoyage, supprimé l'adjonction d'oxygène, garanti la constance de la puissance et réduit les temps de réponse aux variations de puissance (rampes de démarrage et d'extinction de faisceau).

## 5.4 - Les lasers à Gaz CO<sub>2</sub> statiques (SLAB).

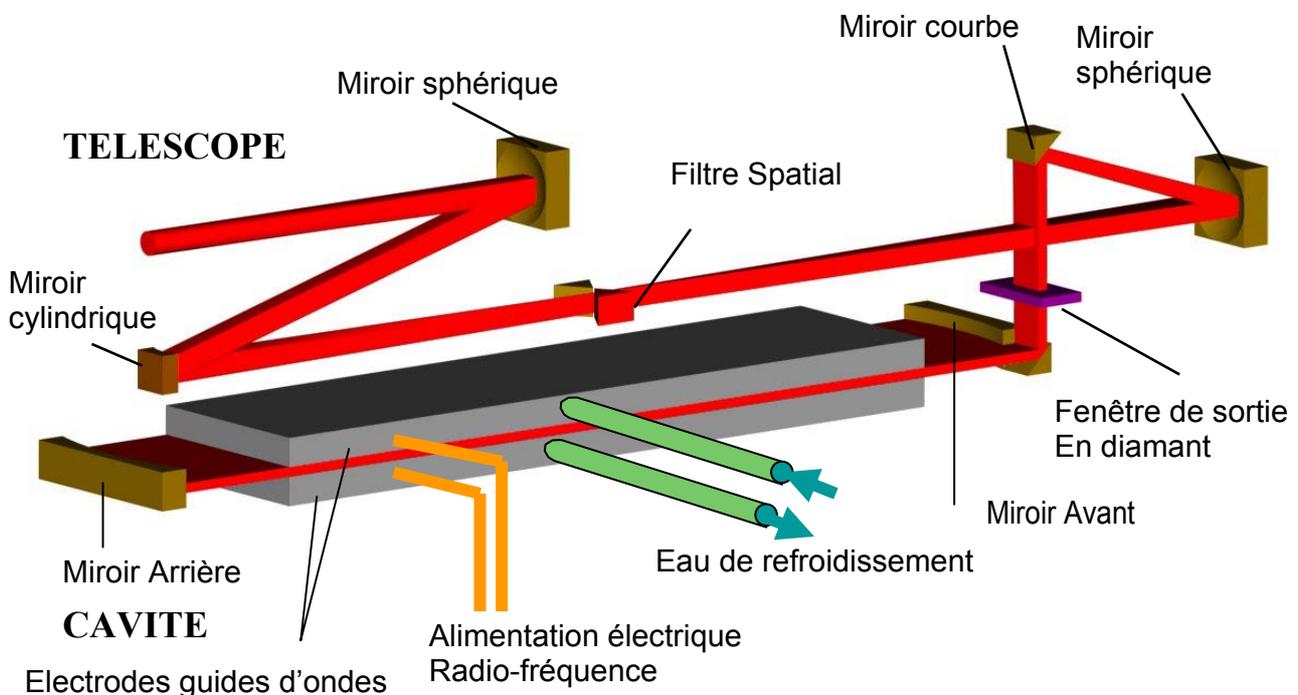
Longueur d'onde : 10,6  $\mu\text{m}$  (Domaine infrarouge  $\rightarrow$  Pas de focalisation par l'œil humain)

Ce type de source est entièrement statique (aucune turbine de circulation de gaz).

La cavité étanche, de petit volume, est remplie en gaz environ une fois toutes les 72 heures après que le vide ait été réalisé par une pompe fonctionnant de 1 à 3 mn suivant le modèle. Le mélange gazeux (PREMIX) est livré en l'état par le fournisseur de gaz. Introduit dans la cavité, ce mélange est excité par une décharge générée entre les électrodes du guide d'onde à l'aide d'une tension électrique radio-fréquence (80 MHz). Le résonateur est constitué de deux miroirs courbes, le miroir avant étant plus court que le miroir arrière (extraction du faisceau). Le faisceau de forme rectangulaire est extrait de la cavité par l'intermédiaire d'une fenêtre en diamant synthétique (sans usure). Il est injecté dans un télescope muni d'un filtre spatial qui le transforme en un faisceau cylindrique d'excellente qualité en terme de répartition énergétique.

Cette technologie présente de nombreux avantages :

- source très compacte.
- rendement élevé.
- réduction des consommables et énergie.
- réduction de la maintenance.
- temps de réponse très court.
- très bonne qualité de faisceau (facteur K)



## V – LES SOURCES LASER EN SOUDAGE.

Les technologies YAG et CO<sub>2</sub> sont deux technologies aujourd'hui complémentaires :

- le laser CO<sub>2</sub> est surtout employé pour les fortes épaisseurs (jusqu'à 8 mm) donc essentiellement pour les pièces mécaniques. Les fortes puissances et la bonne qualité de faisceau obtenues aujourd'hui en font un bon outil dans les applications sur alliages d'aluminium.

- Le laser YAG continu est principalement utilisé dans les applications carrosserie du fait de la possibilité de travail en trois dimensions. Le transport de ce type de faisceau par fibre optique en fait l'outil privilégié des applications utilisant la robotique. D'autre part la meilleure absorption de l'énergie par l'aluminium favorise cette technologie pour le soudage des alliages légers. Le coût de ce type de source et les frais de maintenance induits pénalisent pour l'instant cette technologie par rapport à la technologie CO<sub>2</sub>.

L'arrivée des YAG à disques pompés par diodes peut faire évoluer cette situation dans le futur.

- Le laser YAG pulsé est préféré lorsqu'il s'agit de faibles épaisseurs (inférieures au mm) ou pour les assemblages de très grande précision (micro soudage). La pulsation permet une meilleure maîtrise de l'énergie donc de limiter fortement les déformations.

- Les diodes laser ne permettent pas le soudage par fusion du fait de la qualité de leur faisceau. Elles peuvent être utilisées dans les applications de soudages de produits fins par forgeage ou pour les opérations de brasage.

La technologie laser est en permanente évolution, elle progresse très rapidement et nécessite un suivi et une remise en cause permanente des choix industriels par les services ingénierie.

\*\*\*\*\*

Principaux fournisseurs :

**HAAS LASER – TRUMPF** : YAG, YAG pulsé, Diodes, CO<sub>2</sub> flux axial rapide et Slab (2 kW)

**ROFIN – BAASEL** : YAG, YAG pulsé, Diodes, CO<sub>2</sub> flux transverse, flux axial rapide ,Slab (6 kW)

**CHEVAL Frères** : YAG pulsé

