

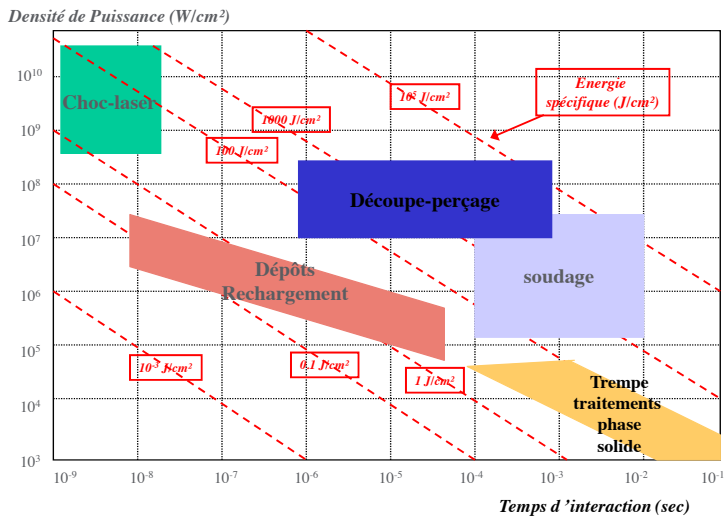
# GM-3-PROFA

Lasers de puissance

Thomas Elguedj et Thibaut Chaise

Équipe Procédés de Fabrication GM  
INSA-Lyon

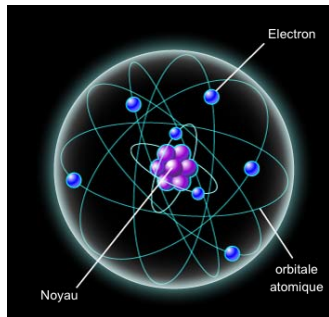
# LASERS DE PUISSANCE : POUR QUOI FAIRE ?



Cas des matériaux métalliques.

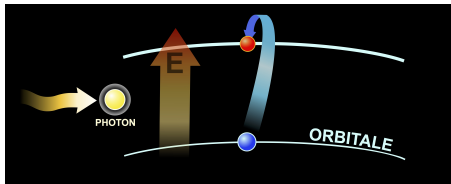
# ATOMES ET NIVEAUX D'ÉNERGIE

- Un atome est constitué d'un noyau et d'électrons qui gravitent autour de celui-ci.
- La position spatiale des électrons peut être décrite par les orbitales atomiques.
- Dans une version simplifiée de la réalité physique, on peut imaginer les orbitales comme représentant les différents niveaux d'énergie d'un atome.

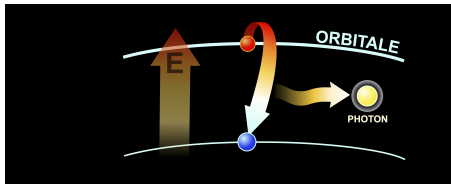


# INTERACTIONS LUMIÈRE / MATIÈRE I

Deux phénomènes de base peuvent être envisagés :



- **Absorption** : un photon est absorbé et provoque une hausse d'énergie  $E_1 \rightarrow E_2$ .

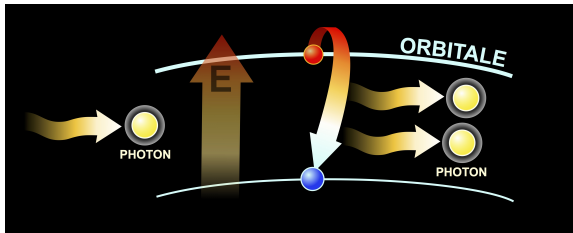


- **Emission spontanée** : un atome dans un état d'énergie élevé émet ( $E_2 \rightarrow E_1$ ) un photon de direction et phase quelconque.

La conservation de l'énergie impose  $W = E_2 - E_1 = h\nu$ , ou  $\nu$  est la fréquence du photon et  $h$  la constante de Planck.

## INTERACTIONS LUMIÈRE / MATIÈRE II

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, Einstein a montré l'existence d'une 3<sup>ème</sup> possibilité : l'**émission stimulée**.

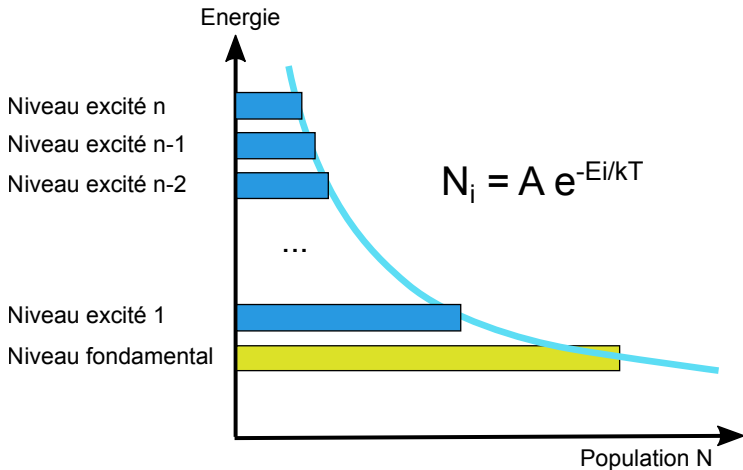


- Un atome excité absorbant un photon de fréquence adéquate change de niveau d'énergie ( $E_2 \rightarrow E_1$ ) et émet deux photons.
- Ces deux photons ont la même direction, la même fréquence et la même phase que le photon incident.
- On parle alors d'émission cohérente.

## EMISSION STIMULÉE : CONDITIONS NÉCESSAIRES ?

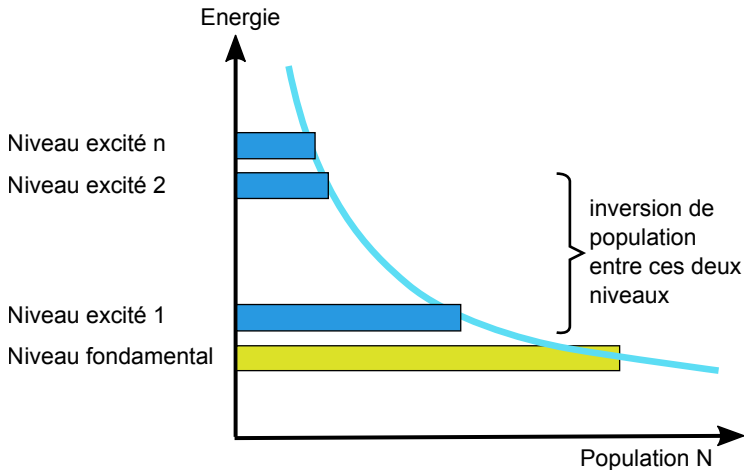
- Pour que l'émission stimulée fonctionne, on doit avoir en permanence plus d'atomes au niveau  $E_2$  qu'au niveau  $E_1$ .
- Il faut donc réaliser une **inversion de population**, le niveau le plus faible  $E_1$  étant le plus stable et donc le plus courant.
- A l'état stable, la population des différents niveaux d'énergie est régi par la statistique de Boltzman.
- Plus l'énergie d'un niveau donné est importante, moins il est peuplé.

# EMISSION STIMULÉE : CONDITIONS NÉCESSAIRES ?



Population des niveaux d'énergie - loi de Boltzman

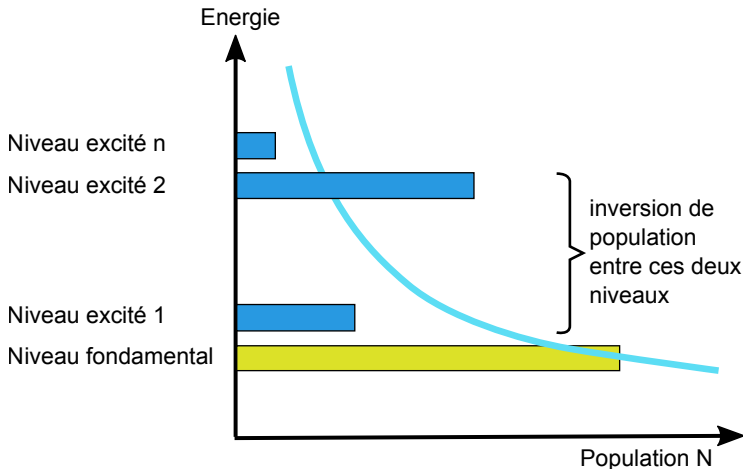
# EMISSION STIMULÉE : CONDITIONS NÉCESSAIRES ?



Inversion de population pour que  $N_2 > N_1$

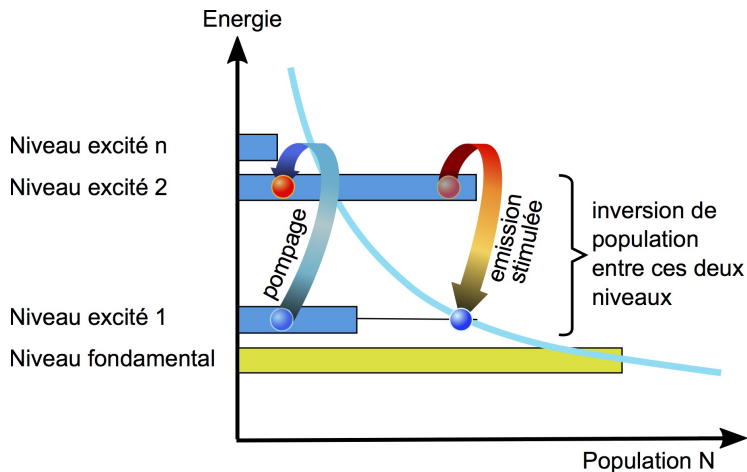


# EMISSION STIMULÉE : CONDITIONS NÉCESSAIRES ?



Inversion de population pour que  $N_2 > N_1$

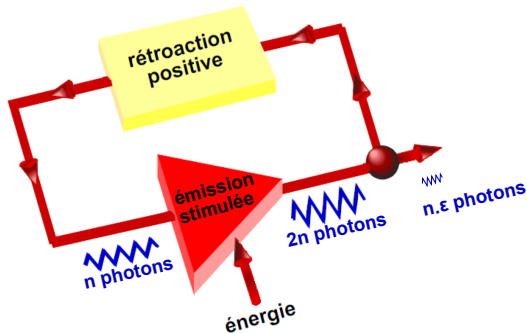
# EMISSION STIMULÉE : CONDITIONS NÉCESSAIRES ?



Maintient de la surpopulation du niveau 2 par pompage pour compenser l'émission stimulée

# LASER

## Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation



Propriétés du faisceau :

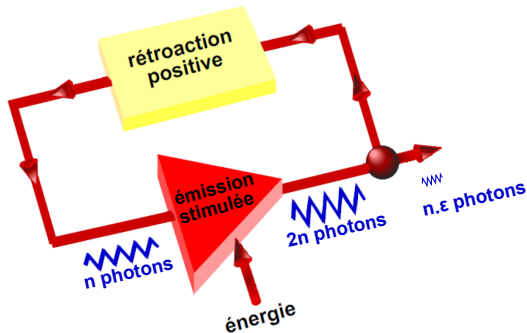
- quasi-parallèle,
- monochromatique,
- cohérent.

Donc source d'une très grande brillance.

L'onde est amplifiée par exemple par une cavité résonante optique (interféromètre de Fabry-Pérot).

# LASER

## Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

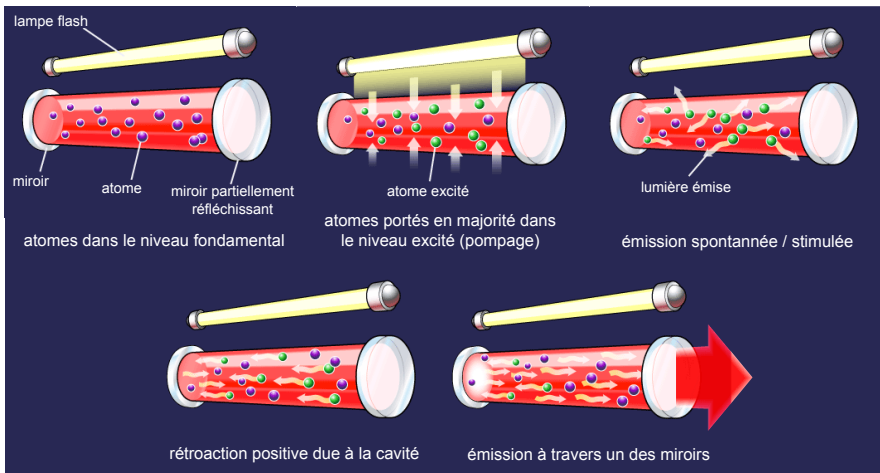


Eléments de base d'un laser :

- milieu amplificateur,
- pompage,
- cavité résonante.

L'onde est amplifiée par exemple par une cavité résonante optique (interféromètre de Fabry-Pérot).

# RÉSUMÉ



# BILAN : MILIEU AMPLIFICATEURS ET POMPAGE

**Milieus amplificateurs** : plusieurs centaines.

- Solide : ions dans monocristal ou verre.
- Liquide : colorants.
- Gaz : plasmas.
- Jonction semi-conducteurs : diode.
- Radicaux libres : excimères.
- Etc.

**Pompage** : environ 40 méthodes.

→ Plus de 1000 lasers ... dans les labos de recherche.

# BILAN : ORDRES DE GRANDEUR

## Puissance émise.

- quelques  $\mu\text{W}$  à quelques dizaines de kW (sources industrielles).

## Durée d'émission.

- du continu à  $10^{-15}\text{s}$ .

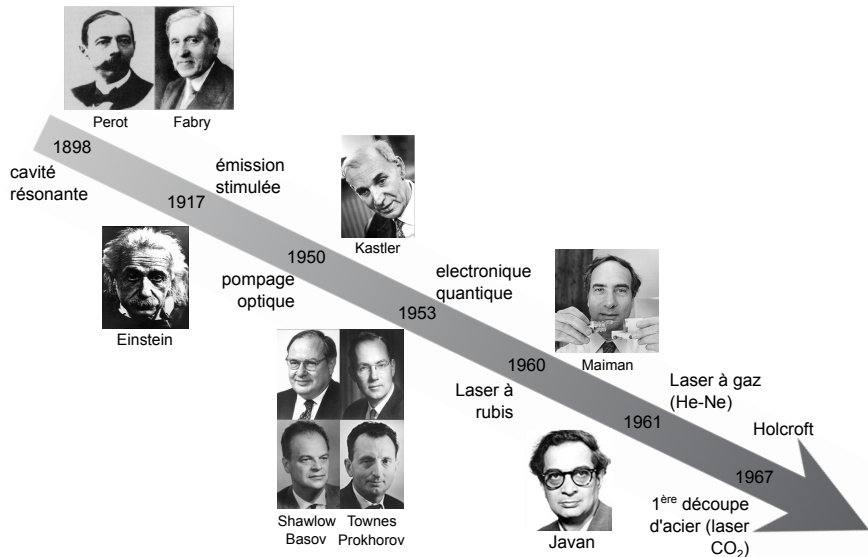
## Energie par impulsion.

- du mJ à quelques dizaines de J.

Deux douzaines de lasers industriels.

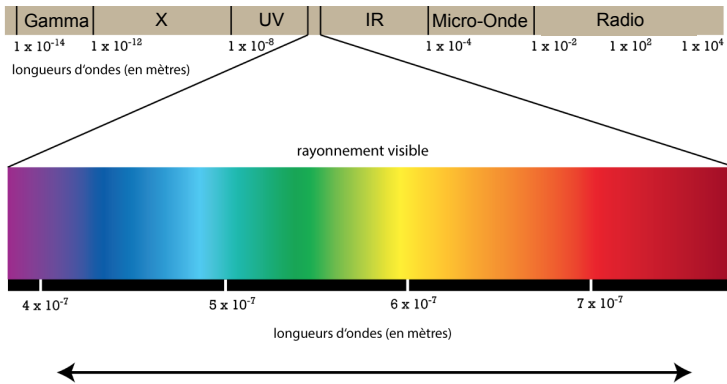
→ Lasers de puissance **P > 100W**.

## HISTORIQUE

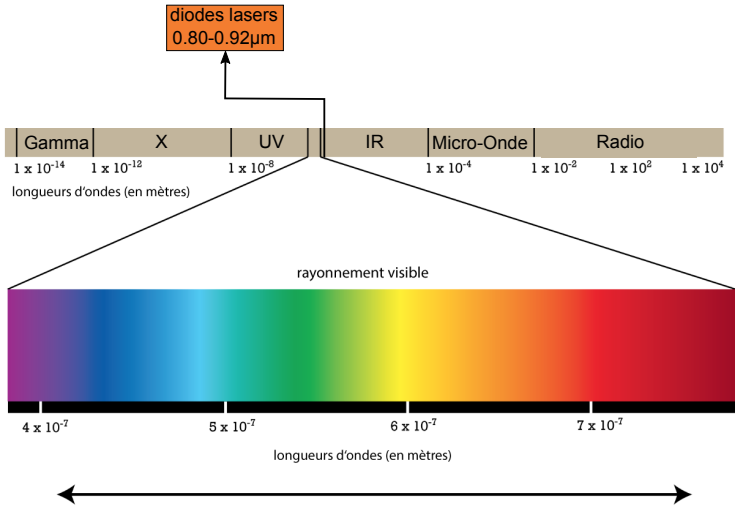




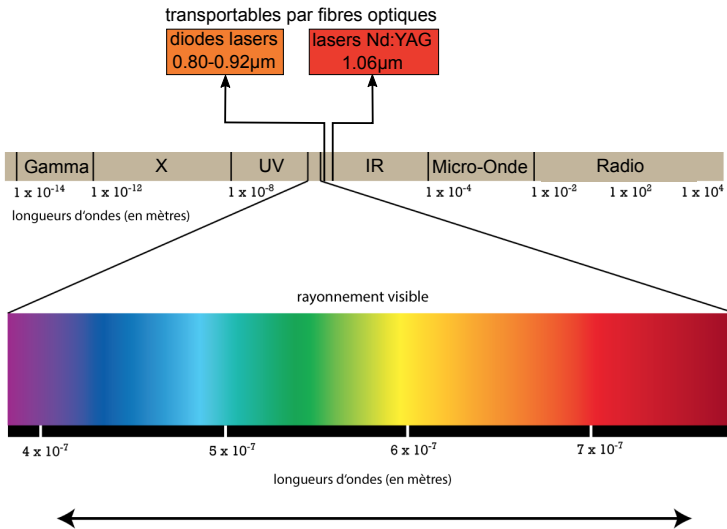
# SOURCES DISPONIBLES



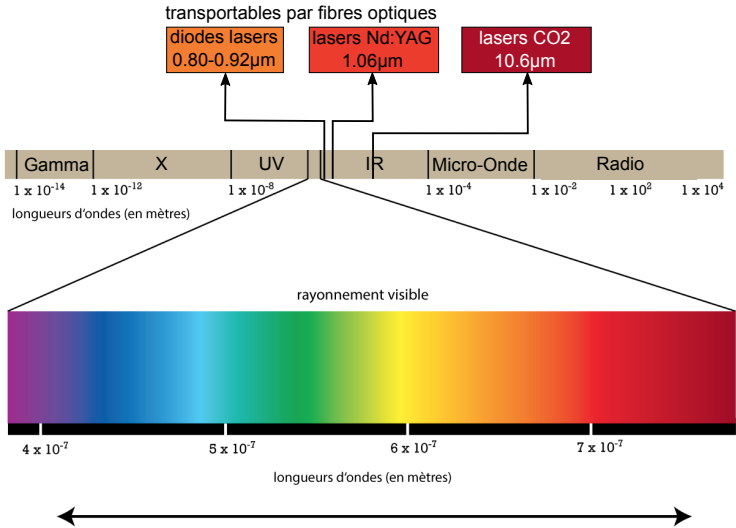
# SOURCES DISPONIBLES



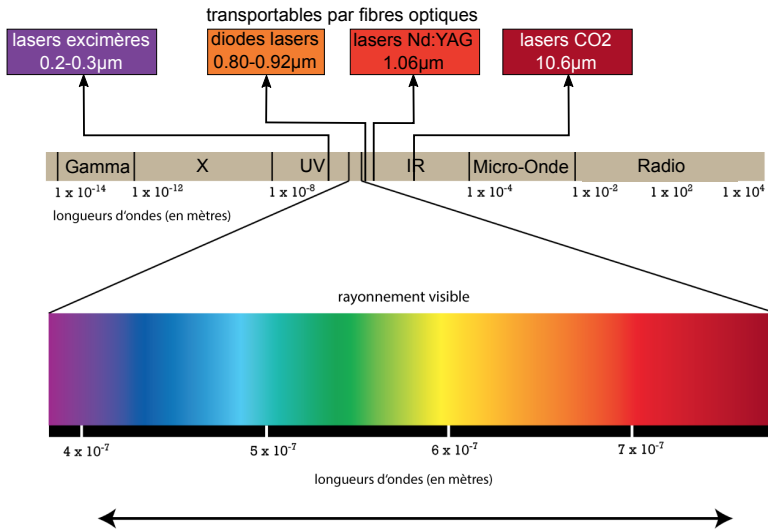
# SOURCES DISPONIBLES



# SOURCES DISPONIBLES

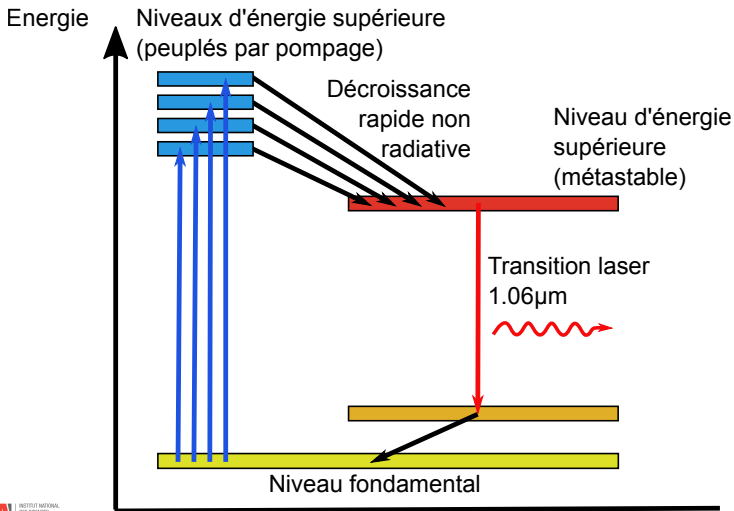


# SOURCES DISPONIBLES



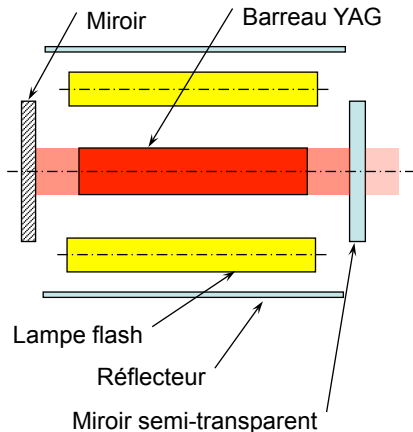
# LASER YAG - ND

Monocristal Yttrium - Grenat– Aluminium dopé au Néodyme.



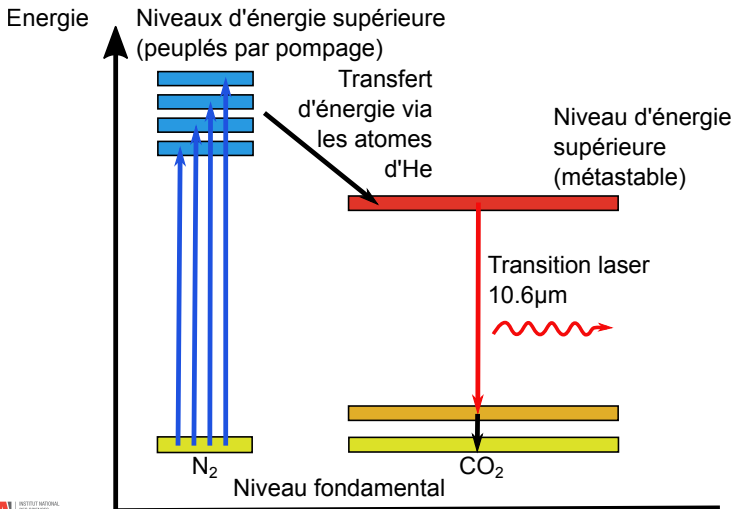
# LASER YAG - ND II

- Pompage optique (lampes flash ou diodes).
- Proche IR  $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ .
- Transport du faisceau par fibre optique.
- Sources continues (100W à 10kW) ou pulsées (qq. 10J, 10ns à 100 ms, 1 kW moyen, 1 GW instantané).



# LASER CO<sub>2</sub>

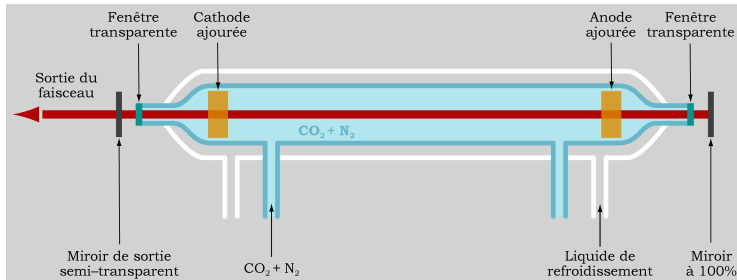
Mélange gazeux : 50% N<sub>2</sub> 50% He 1% CO<sub>2</sub>.





# LASER CO<sub>2</sub> II

- Pompage par décharge électrique ou RF.
- IR moyen  $\lambda = 10.6\mu\text{m}$ .
- Transport du faisceau par miroirs et lentilles.
- Sources continues (100W à 50kW).

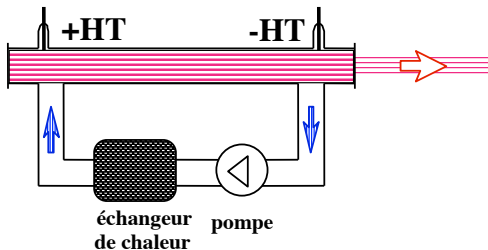


# LASER CO<sub>2</sub> III

- Tube scellé :  $P < 100\text{W/m}$ .

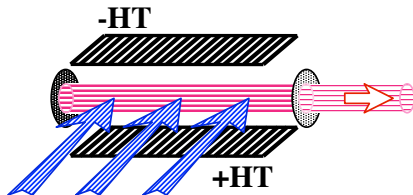


- Flux longitudinal :  $100\text{W/m} < P < 1\text{kW/m}$ .

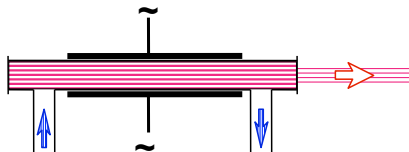


# LASER CO<sub>2</sub> IV

- Flux transversal : P 1 à 10kW/m.

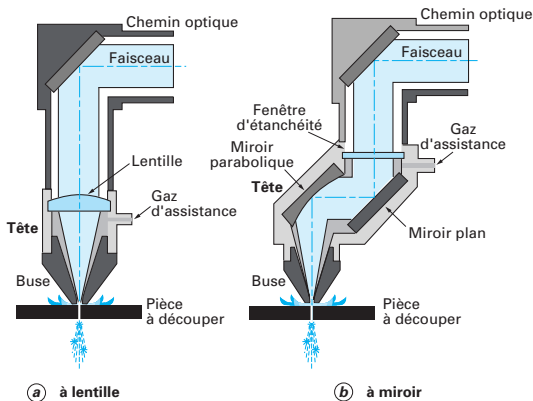


- Excitation Radio-Fréquence : P 1 à 5 kW/m.



# UTILISATION DE LA PUISSANCE

- Densité de puissance  $10^3$  à  $10^9$  W/cm<sup>2</sup> → focalisation.
- Transport du faisceau de la source vers la machine utilisatrice.

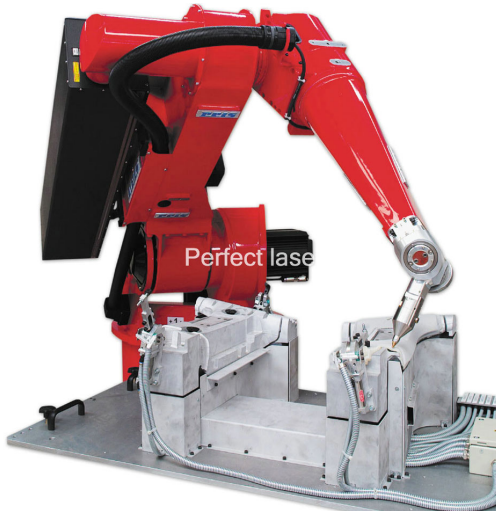


## Matériaux optiques :

- YAG : verres fibres, lentilles.
- CO<sub>2</sub> : lentilles ZnSe, miroirs métalliques.

# MACHINE-OUTIL I

Robot anthropomorphe + fibre optique + montages porte-pièce.

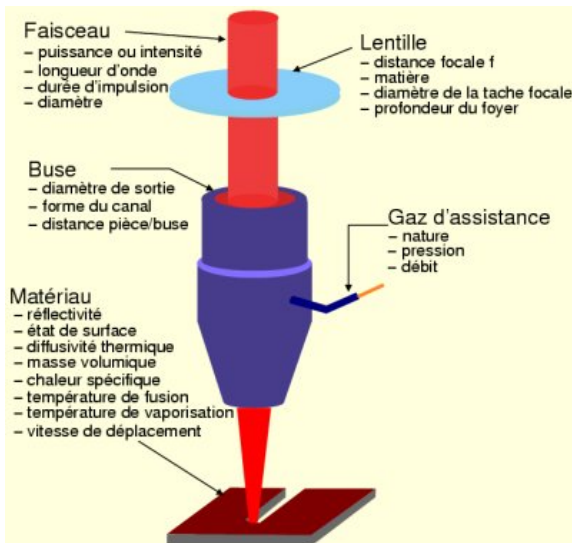


# MACHINE-OUTIL II

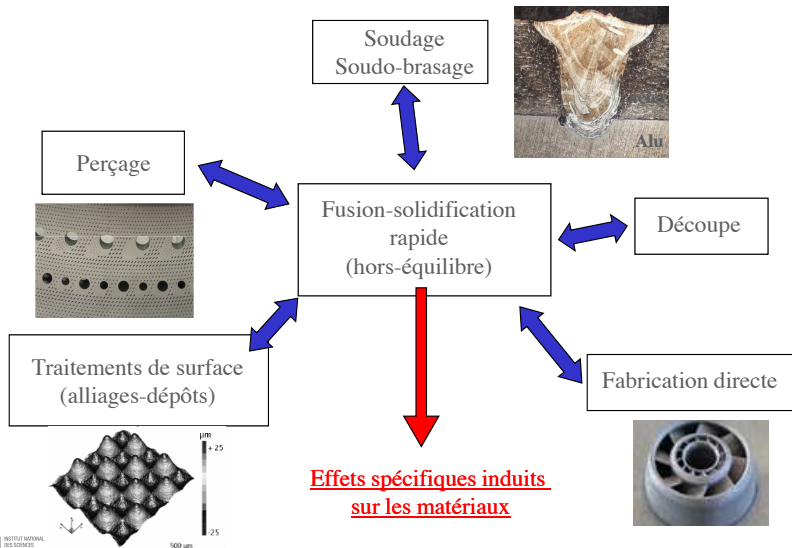
Robot cartésien 3 axes + poignet 2 axes



# PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ



# APPLICATIONS





# USINAGE

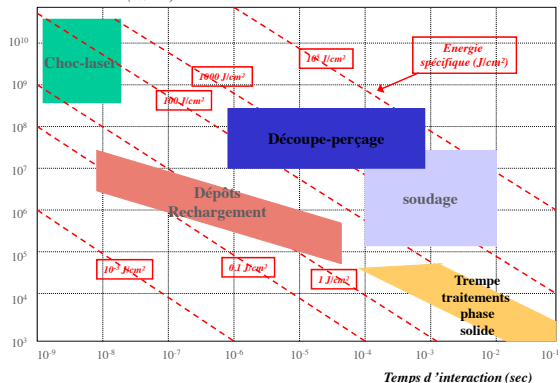
## Phénomènes :

- fusion,
- vaporisation,
- dégradation thermique,
- dégradation photochimique.

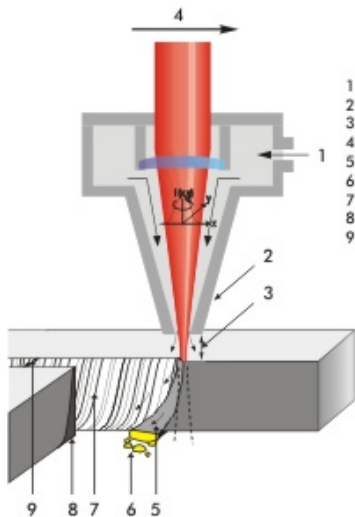
## Matériaux :

- métaux et alliages,
- bois et dérivés,
- plastiques,
- céramiques.

Densité de Puissance ( $W/cm^2$ )



# DÉCOUPE I



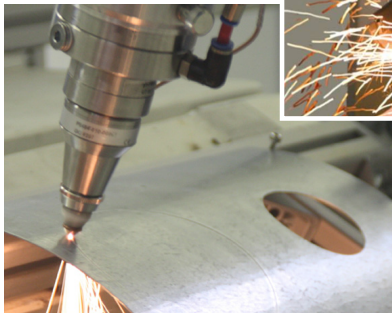
1. Process gas
2. Cutting nozzle
3. Nozzle offset
4. Cutting speed
5. Molten material
6. Dross
7. Cut roughness
8. Heat affected zone
9. Kerf width



$$V_{\max} \approx \frac{P}{e}$$



# DÉCOUPE II

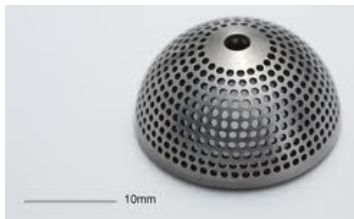
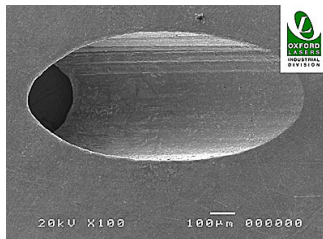


**Laser CO<sub>2</sub> avec  
assistance O<sub>2</sub>  
= micro-oxycoupage**

# DÉCOUPE III

	Laser CO <sub>2</sub>	Laser YAG	Jet d'eau	Oxycoupage	Plasma
<b>Acier</b>	Vitesse (m/min)				
8mm	2,4	1,8	0,097	0,56	2,4
15mm	1,3	--	0,047	0,44	2,35
30mm	0,7	--	0,021	0,38	1,2
<b>Alu</b>	Vitesse (m/min)				
4mm	3,4	4,4	0,77	--	2,8
8mm	1,1	1,5	0,28	--	3,0
10mm	--	1,2	0,27	--	2,0
<b>Inox</b>	Vitesse (m/min)				
3mm	4,1	3,0	0,28	--	2,16
5mm	2,5	1,6	0,16	--	2,4
8mm	1,4	3,8	0,09	--	1,2

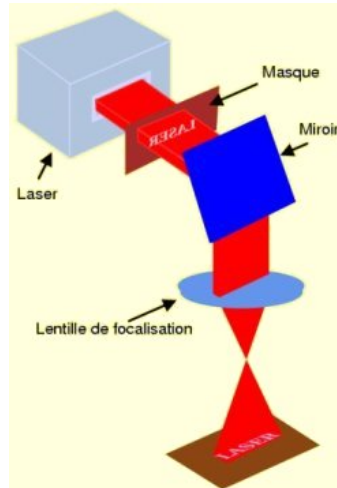
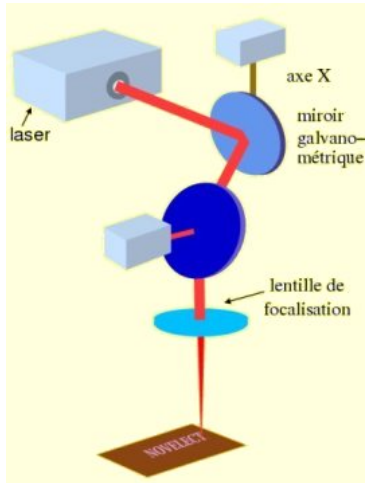
# PERÇAGE



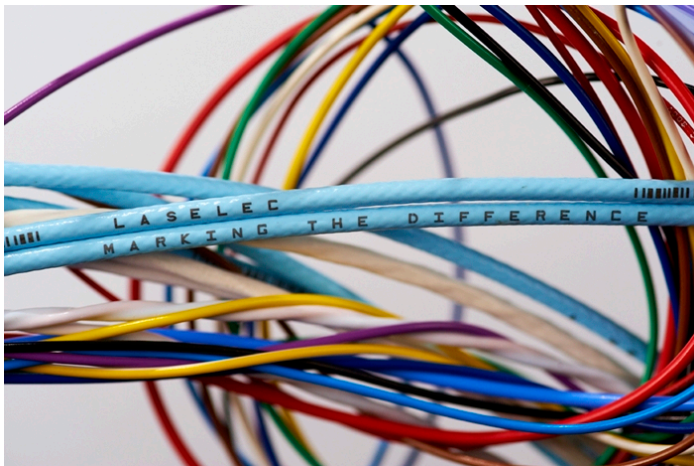
- Perçage oblique de faible diamètre.
- Précision pouvant atteindre le 1/10<sup>ème</sup> de mm.

# MARQUAGE I

Enlèvement de matière ou modification de surface.



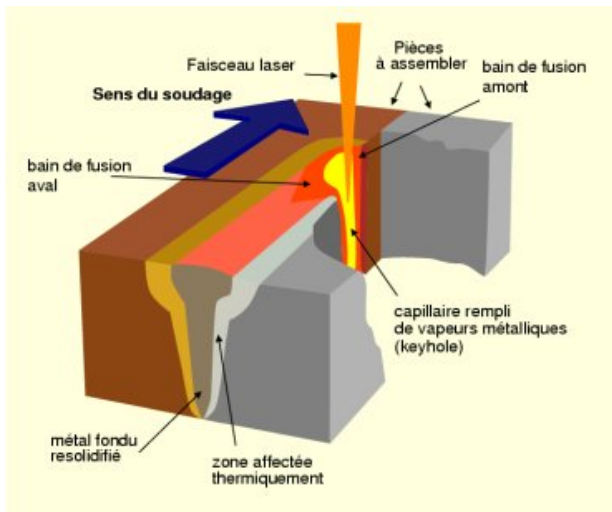
## MARQUAGE II



Identification, traçabilité, ...

# SOUDEGE

Soudage « par pénétration ».

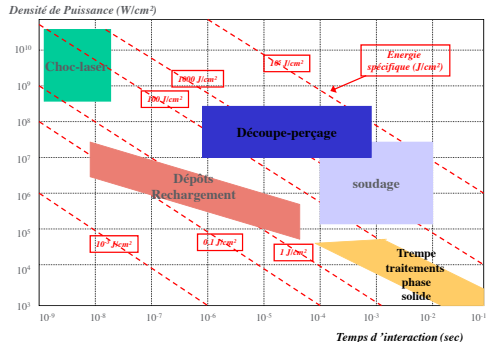




# TRAITEMENT DE SURFACE I

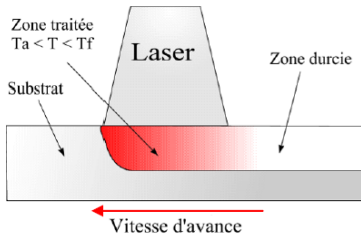
Modification des propriétés des matériaux métalliques.

- A l'état solide :  
trempe  $10^3 \text{ W/cm}^2$ .
- Avec passage à l'état liquide  $10^6 \text{ W/cm}^2$ .
- Gradients thermiques importants.
- Cinétiques rapides.
- Traitements localisés.

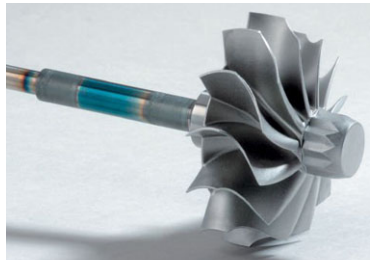


- Refusion/texturation de surface.
- Dépôts/rechargement.
- Création d'alliages in-situ.

# TRAITEMENT DE SURFACE II



## Trempe durcissement





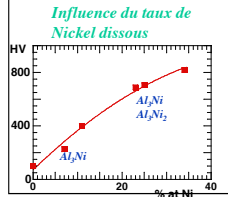
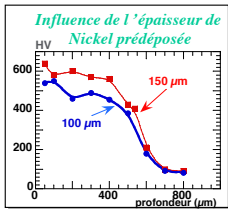
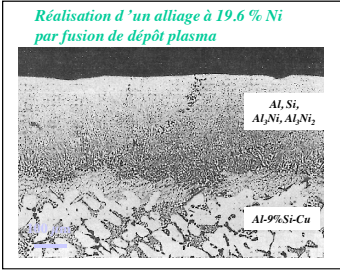
# TRAITEMENT DE SURFACE IV

## Alliages de Surface par laser : Ni sur Al-Si

**But :** Durcir la surface d'alliages d'aluminium moulés Al-Si par réalisation d'un alliage Al-Ni + formation de  $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ni_2$

**Applications :** Tribologiques

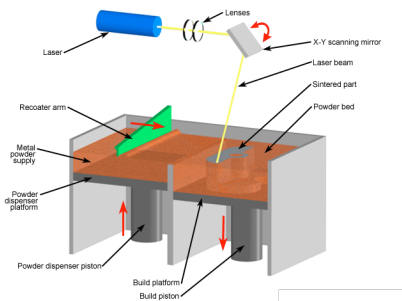
**Irradiation laser :**  $CO_2$  continu -  $10^5 W/cm^2$  (absorptivité <10 %)



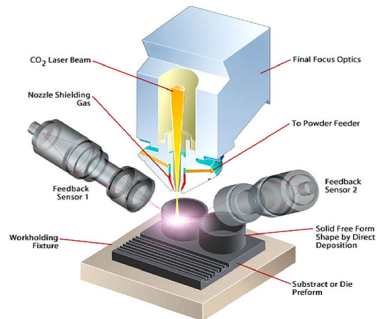
# FABRICATION ADDITIVE I

Fabrication directe par laser.

## ■ Selective Laser Melting



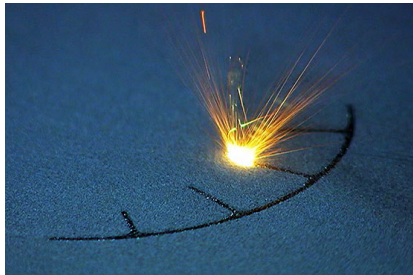
## ■ Direct Energy Deposition



# FABRICATION ADDITIVE I

Fabrication directe par laser.

■ Selective Laser Melting



■ Direct Energy Deposition (DED)

