

Procédés de découpe :

Jet d'eau, électro-érosion à fil, laser

GM-3-PROFA

Équipe Procédés de Fabrication

T. Chaise, T. Elguedj, F. Girardin, L. Martinie, N. Tardif

v.2022

Procédés de découpe

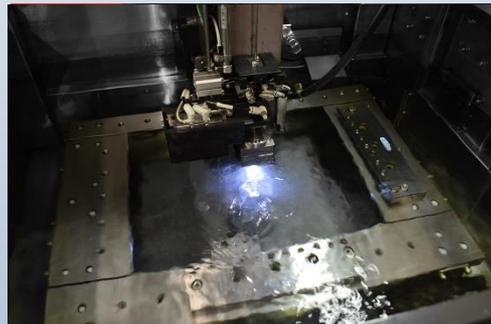
- Découpe de *tôles*
 - Machines à 2 axes... ou plus – Réalisation de surfaces réglées
- ⇒ Possibilité des différents procédés en termes de matériaux, épaisseurs, précisions...

Découpe par jet d'eau
abrasif
Waterjet cutting



Cf. TP

Electro-érosion à fil
Wire EDM

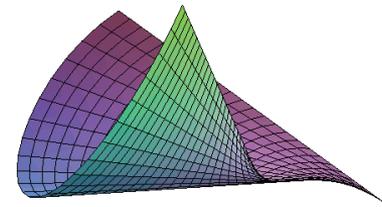
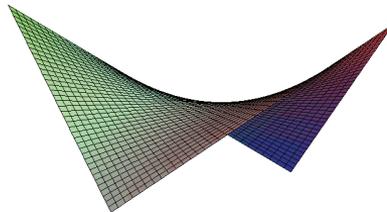
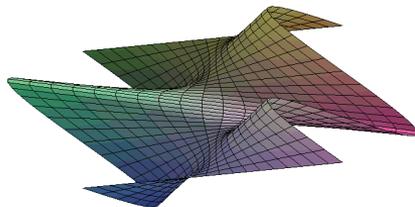
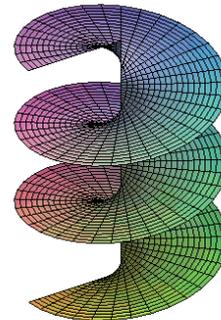
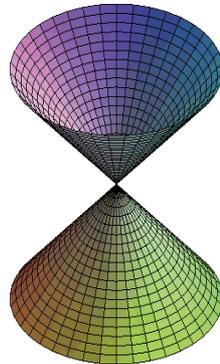
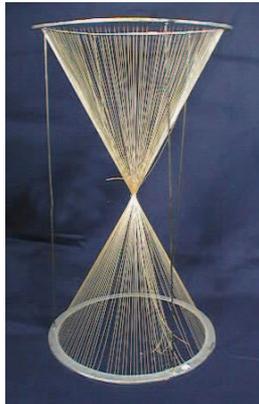
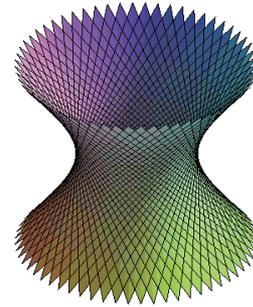
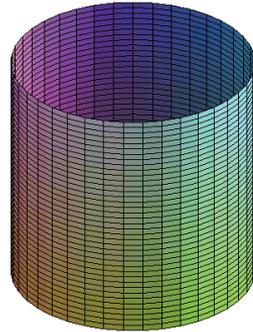


Découpe laser
Laser cutting



SURFACES RÉGLÉES

**Surfaces
régliées**



Procédés de découpe

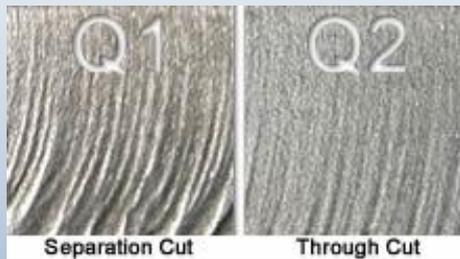
Découpe par jet d'eau abrasif



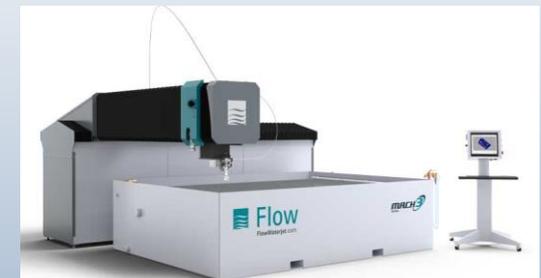
Produit



Matériau



Procédé

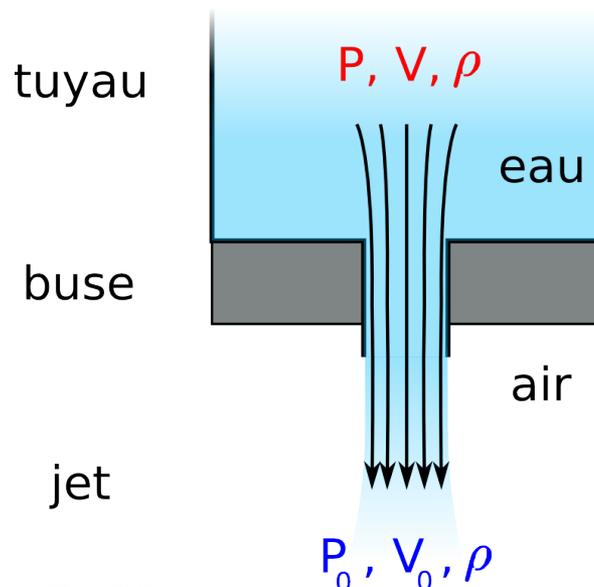


TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE

L'énergie potentielle de l'eau est transformée en énergie cinétique,
 $E_p = P + \rho gh$, $E_c = \frac{1}{2}\rho V^2$.

On applique le théorème de Bernoulli :

$$\frac{1}{2}\rho V_0^2 + P_0 = \frac{1}{2}\rho V^2 + P + \rho gh$$

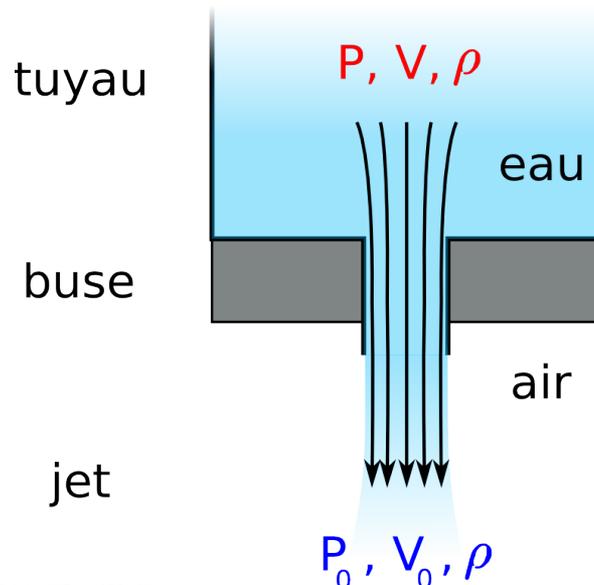


TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE

L'énergie potentielle de l'eau est transformée en énergie cinétique,
 $E_p = P + \rho gh$, $E_c = \frac{1}{2}\rho V^2$.

On applique le théorème de Bernoulli :

$$\frac{1}{2}\rho V_0^2 + \cancel{P_0} = \frac{1}{2}\rho V^2 + P + \cancel{\rho gh}$$

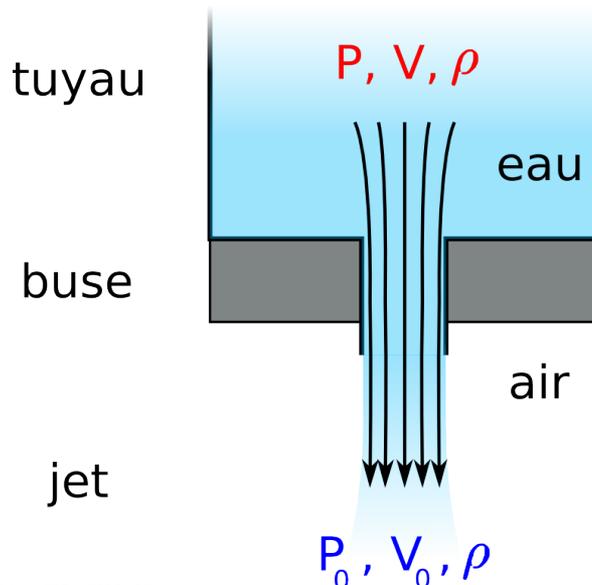


TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE

L'énergie potentielle de l'eau est transformée en énergie cinétique,
 $E_p = P + \rho gh$, $E_c = \frac{1}{2}\rho V^2$.

On applique le théorème de Bernoulli :

$$\frac{1}{2}\rho V_0^2 + \cancel{P_0} = \frac{1}{2}\rho V^2 + P + \cancel{\rho gh}$$



- Vitesse du jet dans l'air

$$V_0 = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}$$

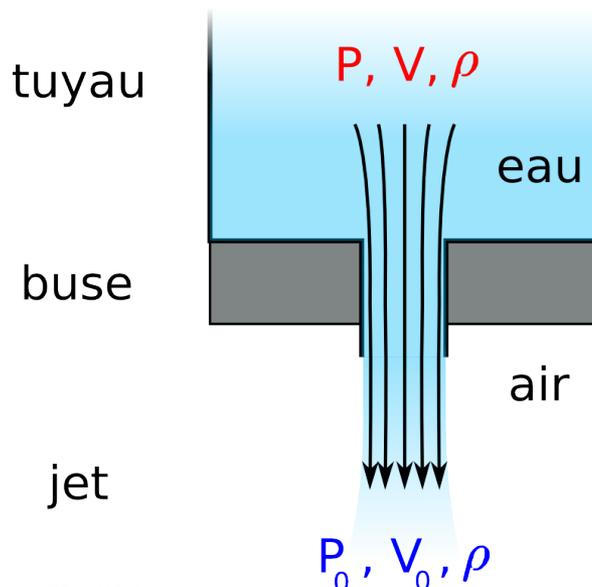
- Pertes de charge $V_j = C_d V_0$
avec $C_d \simeq 0,7$ coeff de décharge.

TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE

L'énergie potentielle de l'eau est transformée en énergie cinétique,
 $E_p = P + \rho gh$, $E_c = \frac{1}{2}\rho V^2$.

On applique le théorème de Bernoulli :

$$\frac{1}{2}\rho V_0^2 + \cancel{P_0} = \frac{1}{2}\rho V^2 + P + \rho gh$$

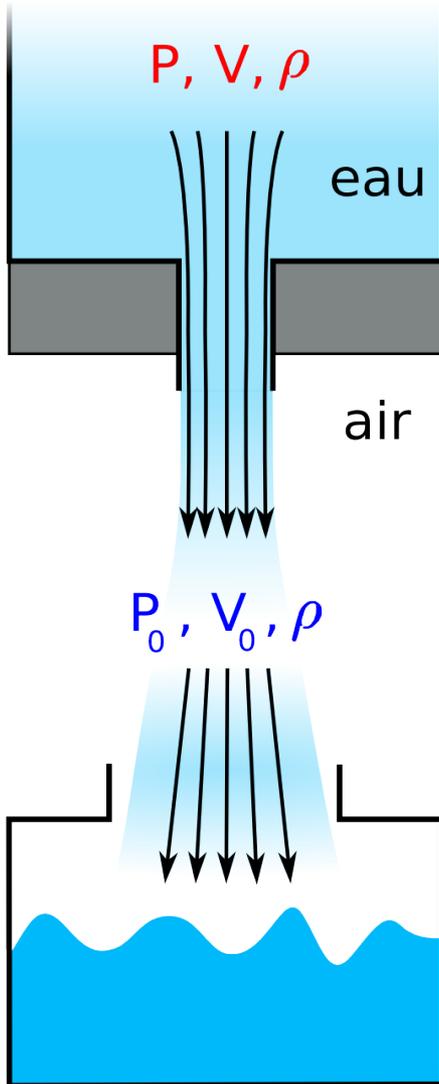


■ Exemple :

P (bars)	V_0 (m.s ⁻¹)	V_j (m.s ⁻¹)
1000	450	315
4000	900	630

■ avec $c_{son/air} = 330\text{m.s}^{-1}$ et
 $c_{son/eau} = 1450\text{m.s}^{-1}$

TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE II



Puissance hydraulique
 Débit d'eau

$$P_h = P Q$$

$$Q = V_j S$$

P=4000bars		
d_{buse} (mm)	Q (l.min ⁻¹)	P_h (kW)
0,15	0,66	4,4
0,33	3,22	21,4

Et si toute l'énergie du jet se transforme en chaleur

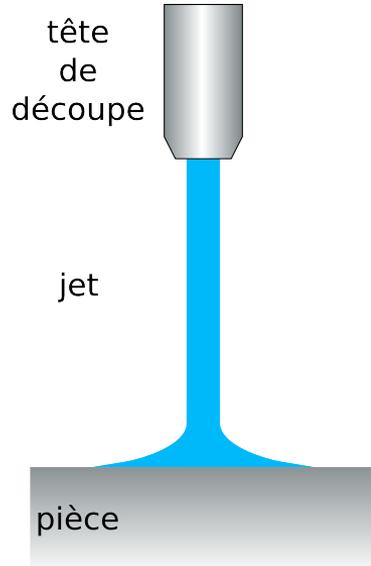
$$\frac{1}{2} \rho V_j^2 = \rho C_p \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{V_j^2}{2C_p}$$

ΔT est l'élévation de température de l'eau.

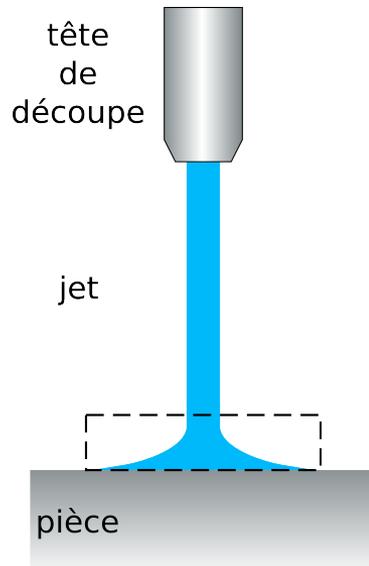
$$d_{buse} = 0,15mm, C_p = 4190J.kg^{-1}.K^{-1}$$

$$\Rightarrow \Delta T = 50^{\circ}C.$$

INTERACTION JET/MATIÈRE

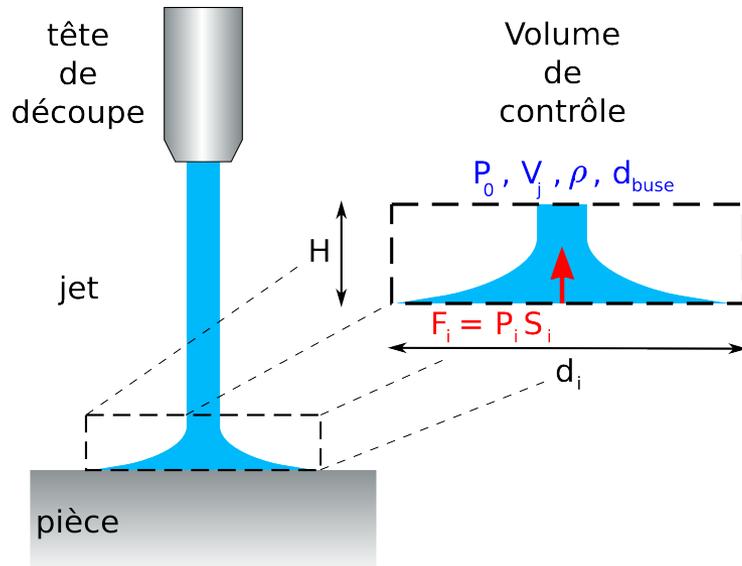


INTERACTION JET/MATIÈRE



On applique le théorème de Bernoulli au volume de contrôle :

INTERACTION JET/MATIÈRE

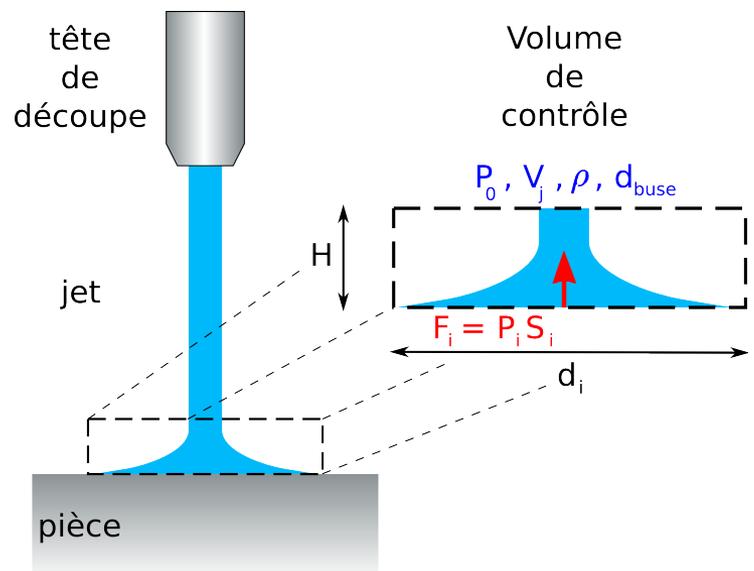


On applique le théorème de Bernoulli au volume de contrôle :

$$\frac{1}{2}\rho V_j^2 + \cancel{P_0} + \cancel{\rho g H}$$

$$= \frac{1}{2}\rho V_{impact}^2 + P_i$$

INTERACTION JET/MATIÈRE



On applique le théorème de Bernoulli au volume de contrôle :

$$\frac{1}{2}\rho V_j^2 + \cancel{P_0} + \cancel{\rho g H}$$

$$= \frac{1}{2}\rho V_{impact}^2 + P_i$$

$$P_i \simeq P \Rightarrow F_i = \frac{1}{2}\rho V_j^2 S_i = \frac{\pi}{4} C_d^2 P d_i^2$$

$P = 4000bars$, $d_{buse} = 0,15mm$, $d_i = 0,5mm$, $C_d = 0,7$
 $\Rightarrow F_i = 39N$. Soit une énergie spécifique $E_s (= P_i = C_d^2 P)$

$$E_s = 0,2J.mm^{-3}$$

A comparer à l'usinage d'un acier $E_s = 2 \text{ à } 3J.mm^{-3}$

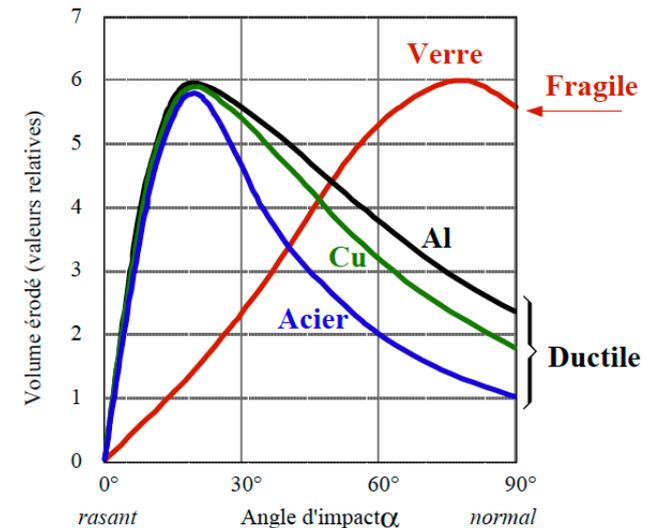
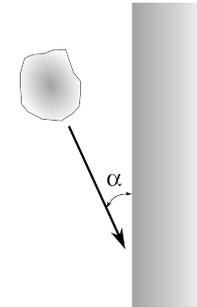
AMÉLIORATION DU PROCÉDÉ

- Avec de l'eau pure l'énergie spécifique est limitée à $E_s = 0.1$ à $1 J.mm^{-3}$, c'est à dire aux matériaux tendres.
- L'idée est d'ajouter à l'action directe du fluide l'impact de **particules dures** : des grains de matériau **abrasif**.
- Le jet fluide passe du rôle d'outil à celui de **vecteur des grains**.
- La vitesse d'impact est la vitesse du fluide.
- Le mode d'enlèvement de matière change.

ENLÈVEMENT DE MATIÈRE

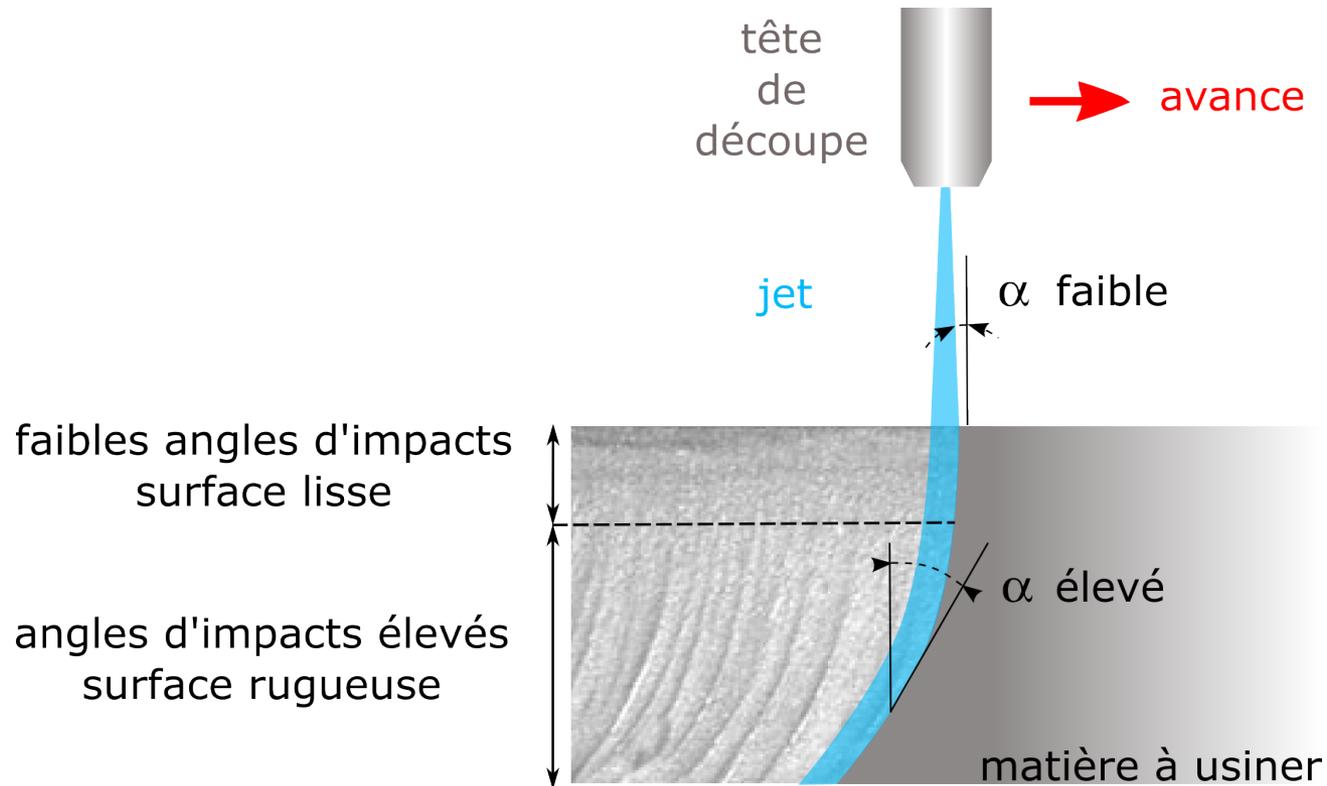
- Angle d'impact faible : **abrasion**.
Collision particules/cible \Rightarrow
formation de copeaux.
- Angle d'impact élevé : **érosion**.

- 1 matériaux ductiles : collision \Rightarrow
plastification \Rightarrow écrouissage \Rightarrow
fatigue (grand nb de cycles) \Rightarrow
rupture
- 2 matériaux fragiles : collision \Rightarrow
fissuration \Rightarrow rupture.



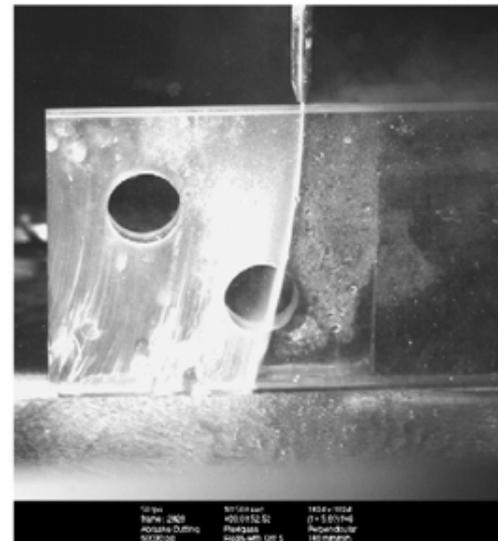
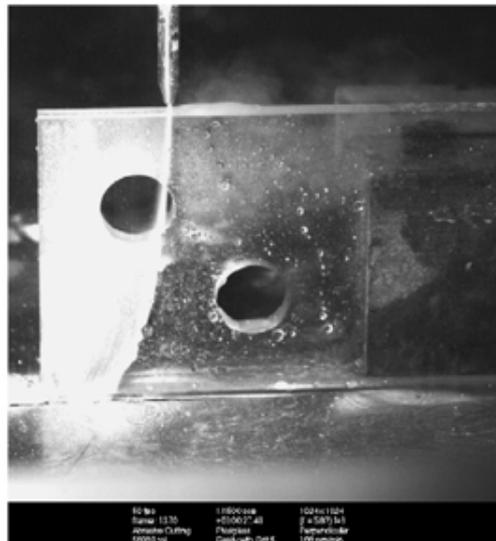
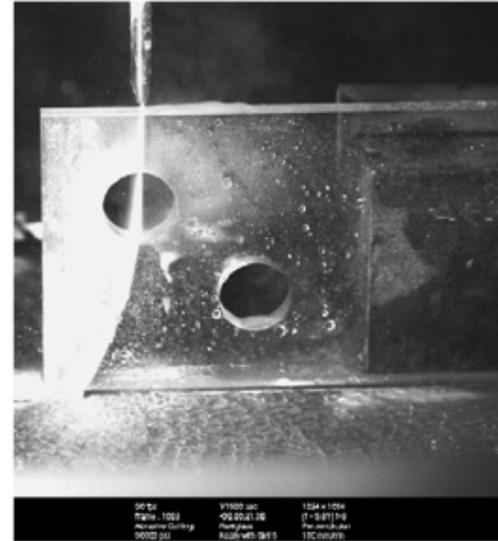
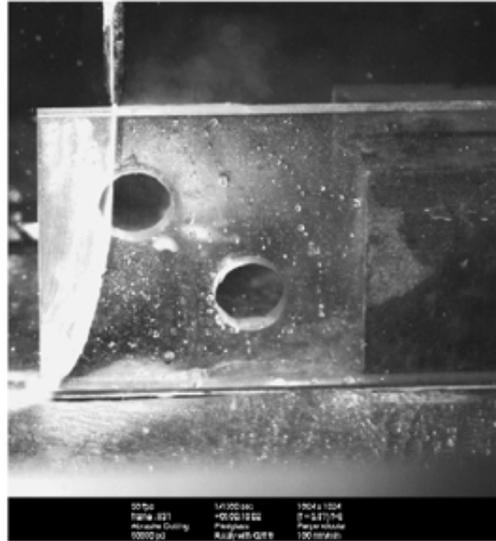
- Le caractère ductile/fragile du matériau est dominant.

ABRASION LORS DE LA DÉCOUPE



Remarque : la pression hydrodynamique du fluide porteur est très faible devant les contraintes mécaniques générées par les particules abrasives.

ABRASION LORS DE LA DÉCOUPE II



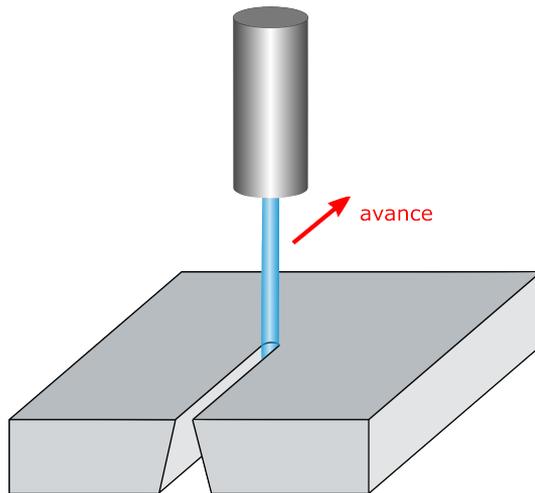
ÉTAT DE LA SURFACE DÉCOUPÉE

1 Défauts micro-géométriques

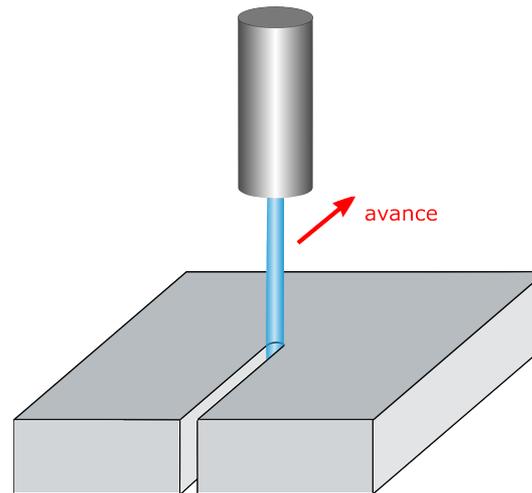
- rugosités : arrachement, micro-usinage, etc...
- ondulations (instabilités du jet)

2 Défauts macro-géométriques

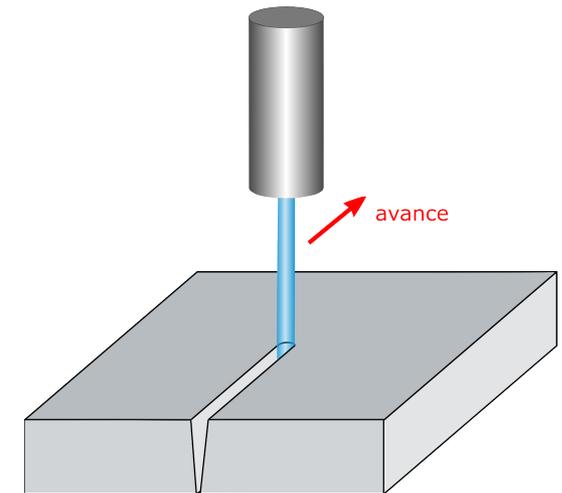
- dépouille dans le plan orthogonal à la vitesse d'avance



vitesse d'avance
trop faible



vitesse d'avance
optimale

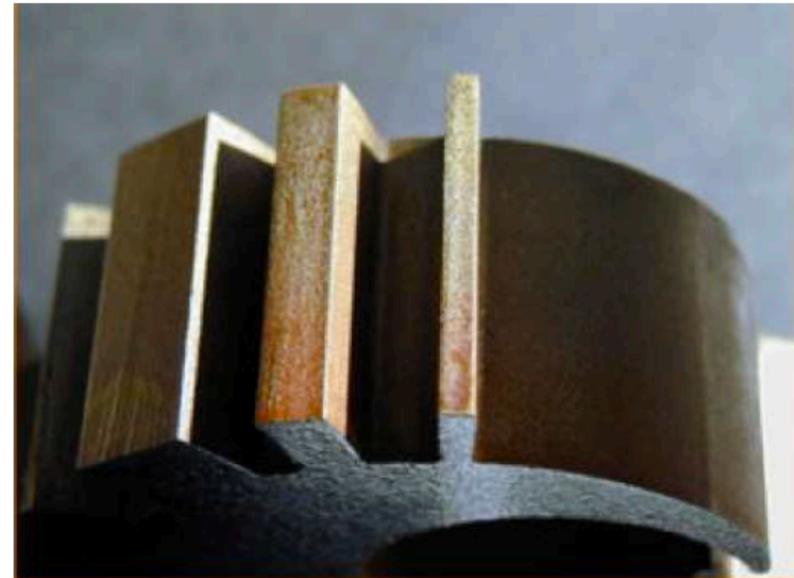
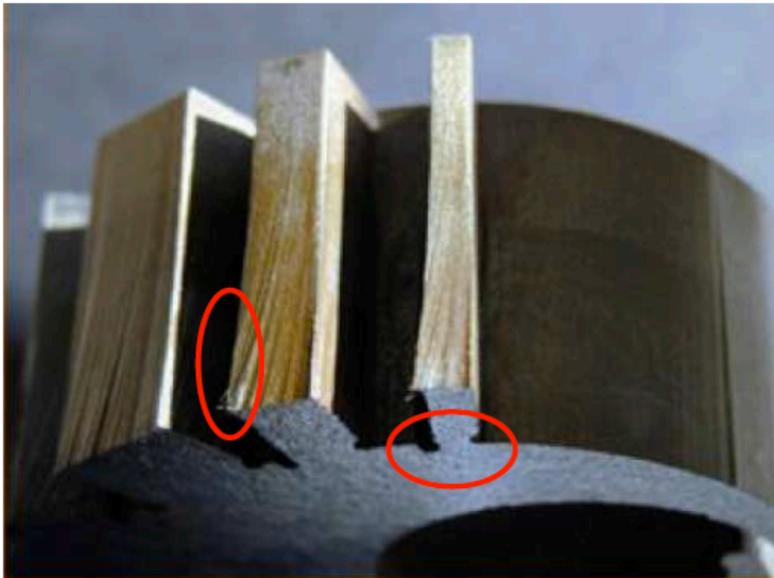


vitesse d'avance
trop forte

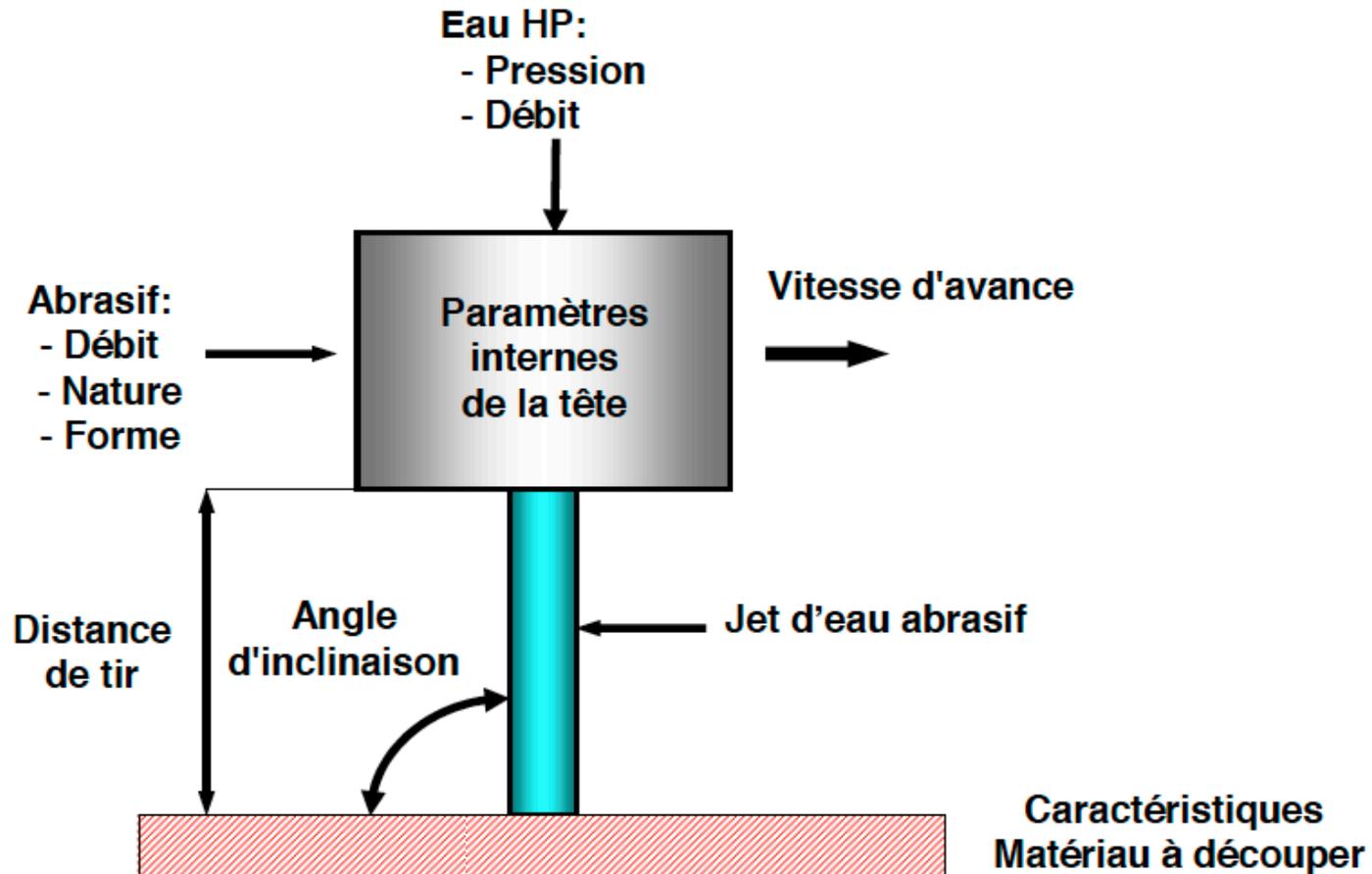
ÉTAT DE LA SURFACE DÉCOUPÉE II

2 Défauts macro-géométriques

- retards à la coupe intérieur et extérieur



PARAMÈTRES DE DÉCOUPE



DÉCOUPE 2D ABRASIVE

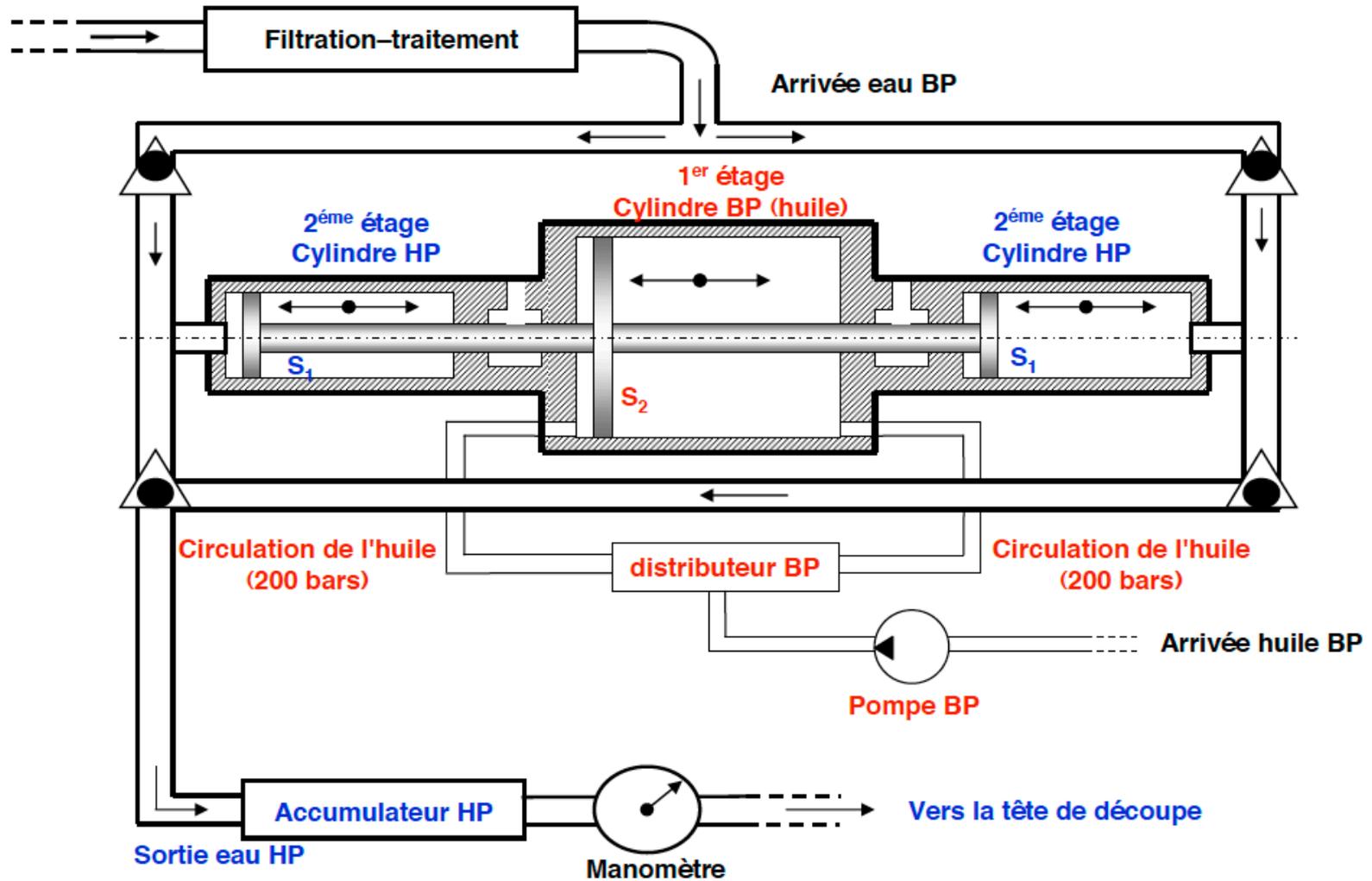
Exemples de vitesses de découpe en mm/min

Matériaux Epaisseur Matériaux	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	50 mm	100 mm
Acier rapide	678	370	236	169	128	102	48	18
Acier inoxydable 304	833	454	290	208	159	125	60	22
Titane	1083	590	377	270	206	163	78	28
Aluminium	2250	1226	782	561	427	339	162	59
Granite (Mohogany)	2974	1621	1035	741	565	448	214	78
Composites Fibres de Carbone	3915	2135	1363	975	744	590	281	103
Verre	4315	2352	1502	1075	820	650	310	113
Marbre	4672	2547	1626	1164	888	704	336	123
Plexiglas	4904	2674	1707	1222	932	739	352	129
Composites Fibre de Verre	5948	3243	2070	1482	1131	896	427	156
Kevlar	6195	3378	2156	1543	1178	934	445	163
Graphite	8087	4409	2815	2015	1538	1219	581	213
Carreau de céramique	8869	4835	3087	2210	1686	1337	637	233

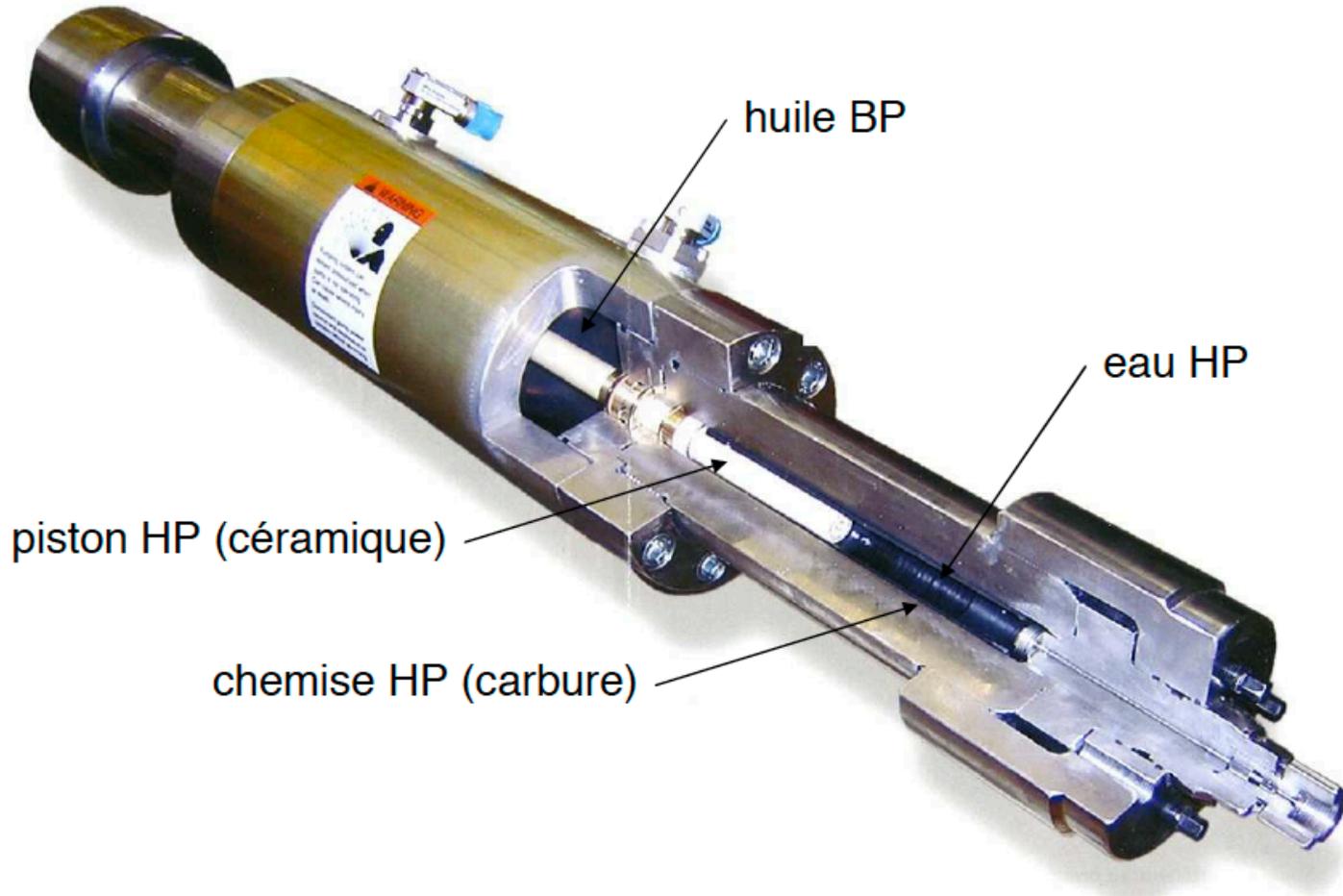
Ces valeurs représentent la vitesse de séparation maximale et sont obtenues en travaillant à 4100 bar, 3,7 l/min, et 580 g/min d'abrasif (FLOW PASERplus Garnet, mesh 80). Pour une découpe d'ébauche, comptez 80% de ces valeurs et 40% pour une découpe de qualité. Ces valeurs sont théoriques et non contractuelles.

D'après FlowEurope.

CIRCUIT HAUTE PRESSION



INTENSIFIEUR

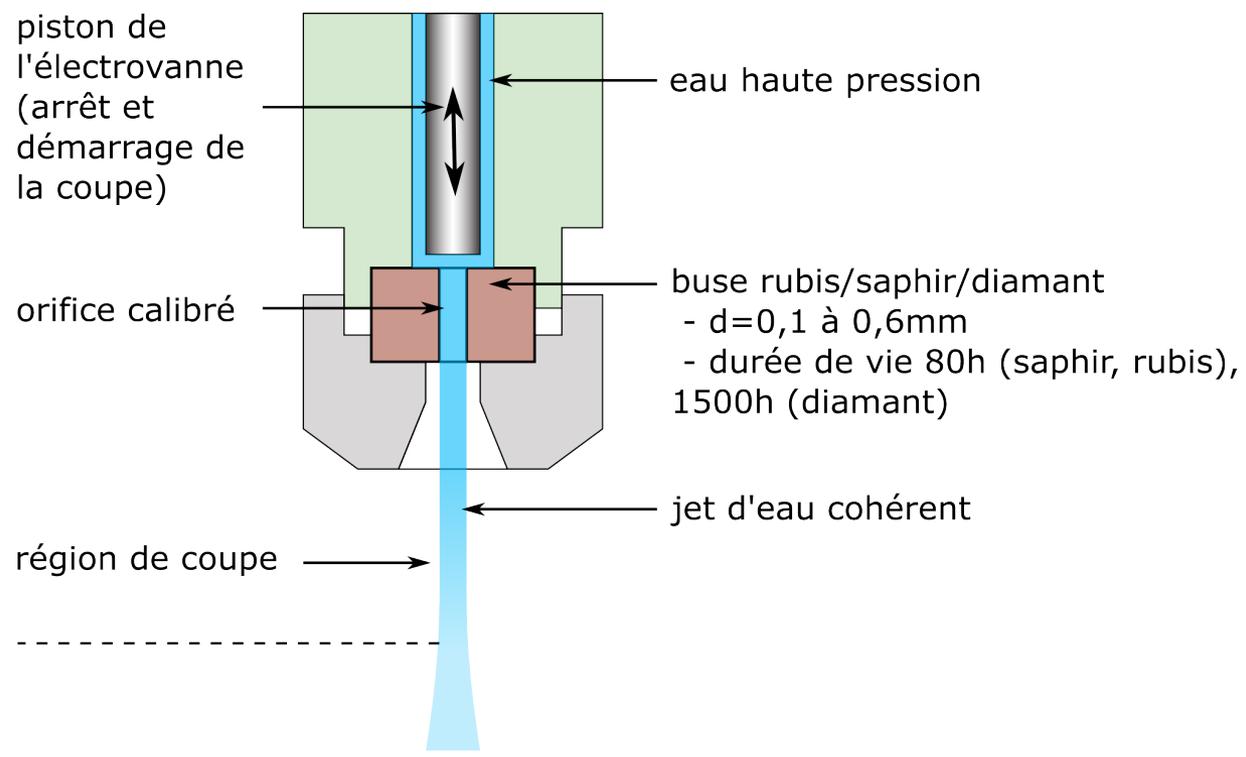


TRANSPORT DU FLUIDE

- 1 Tuyaux flexibles, pour applications jusqu'à 2400bars (nettoyage, hydrodémolition, etc...)
 - tube intérieur en matière synthétique,
 - succession d'enroulements en fibres synthétiques,
 - revêtement final en caoutchouc ou plastique.

- 2 Tuyaux rigides pour applications à 4000bars et plus (découpe)
 - acier inoxydable à haut résistance mécanique $R_m \geq 1100MPa$,
 - diamètre extérieur de 10 à 15mm, épaisseur de 3 à 5mm.

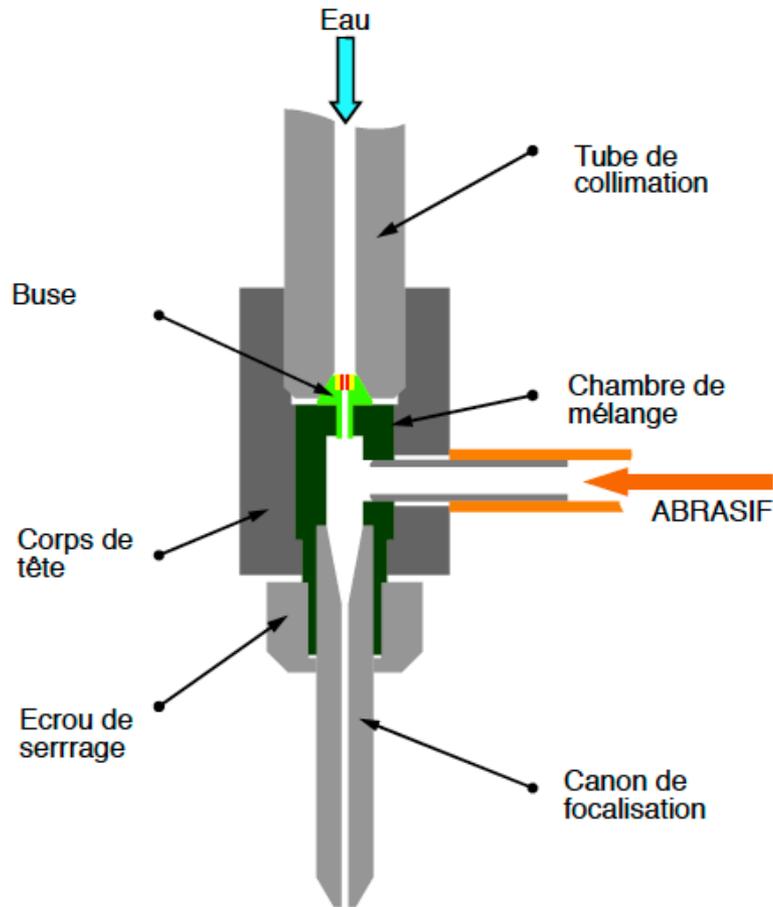
BUSE



Caractéristiques du matériau de la buse :

- permet la formation d'un jet focalisé,
- mise en marche et arrêt du jet instantanée (résistance aux ondes de choc).

TÊTE DE DÉCOUPE À CHAMBRE DE MÉLANGE



Forme éclatée d'une tête de découpe pour jet d'eau abrasif



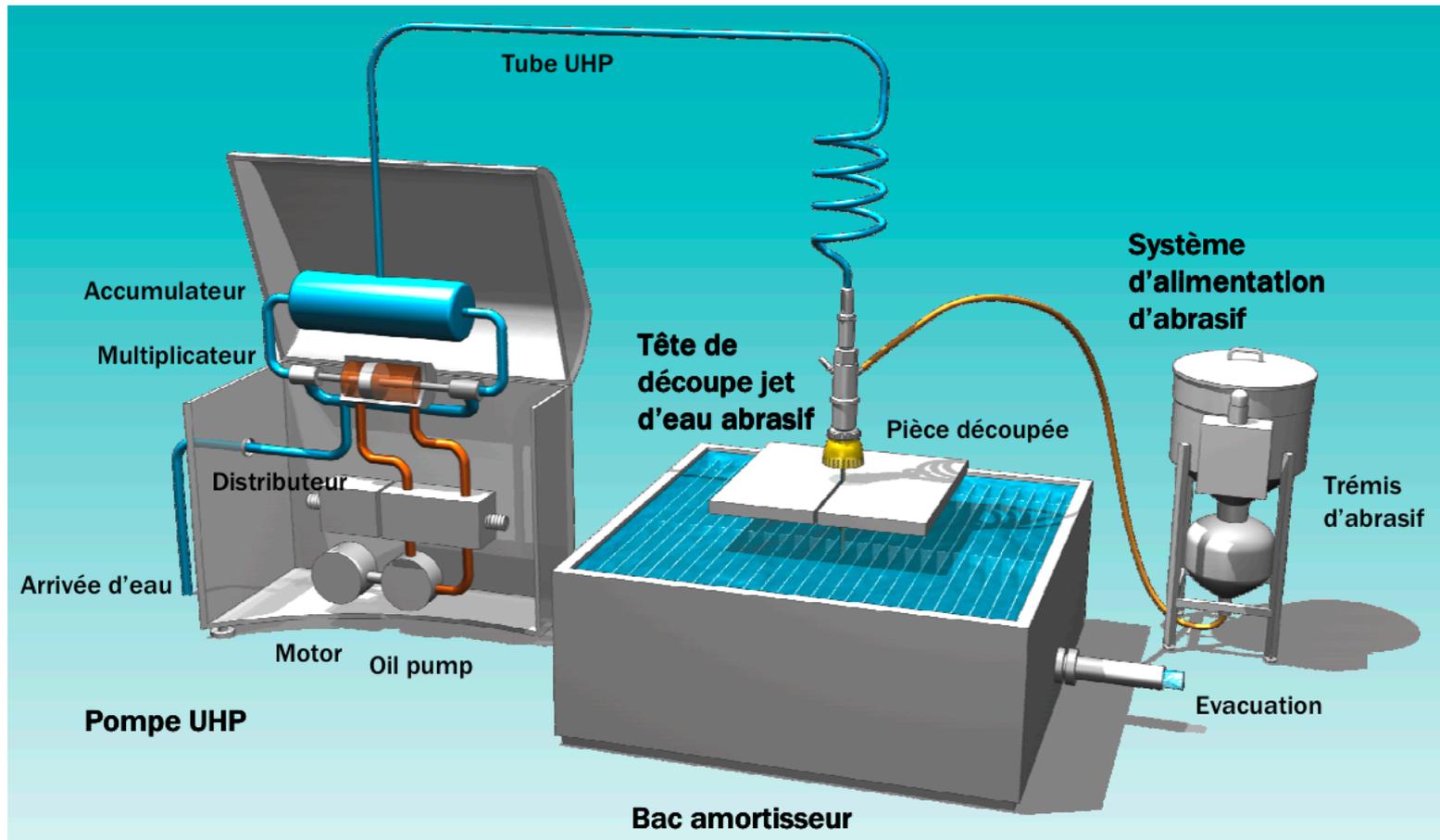
PARTICULES ABRASIVES

Les critères de choix sont :

- caractéristiques abrasifs,
- non agressif vis à vis de la chambre de mélange,
- non nocif à la santé,
- etc...

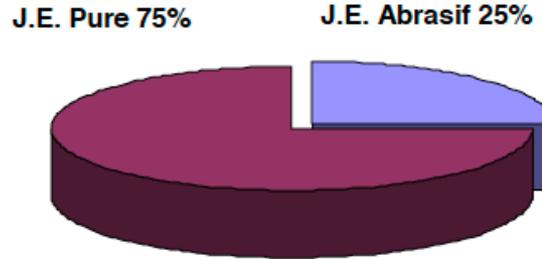
Nature	Dureté (échelle de Mohs)
Laitiers de silicate	6 à 7
Olivine	7
Grenat	10
Oxyde de zirconium	11
Carbure de tungstène	11
Alumine	12
Carbure de silicium	13
Carbure de bore	14
Diamant	15

SYSTÈME DE DÉCOUPE HP

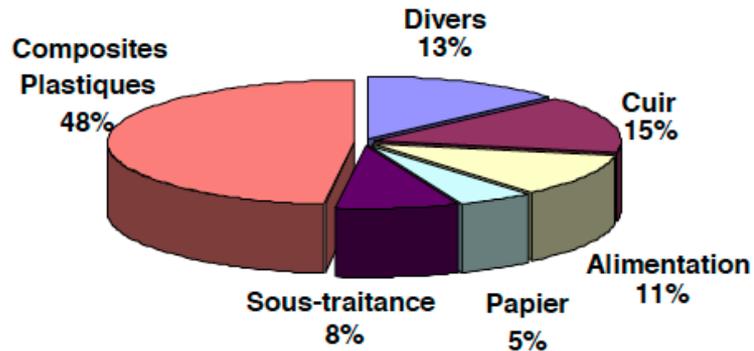


Thomas Cuvelier.
La technologie de découpe au jet d'eau.
Présentation technique Flow France, 2010.

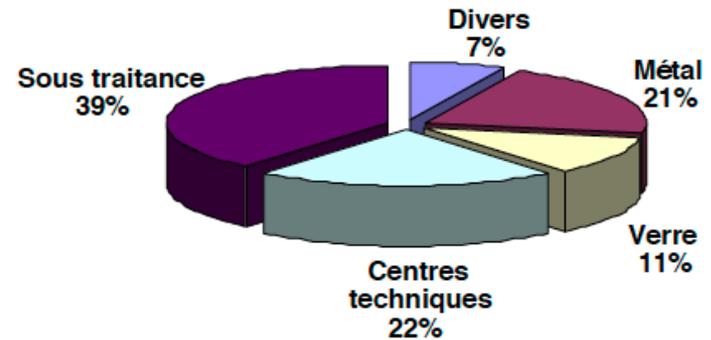
RÉPARTITION DES APPLICATIONS



APPLICATIONS EAU PURE



APPLICATIONS ABRASIVE



DÉCOUPE 2D EAU PURE



Industrie agro-alimentaire : outil stérile, machine entièrement capotée en acier inox.

DÉCOUPE 2D : MÉTAUX



Inconel ép. 100 mm



Aluminium ép. 100 mm



Acier Inoxydable ép. 50 mm



Aluminium ép. 6mm en multi-couche



DÉCOUPE 2D : MÉTAUX

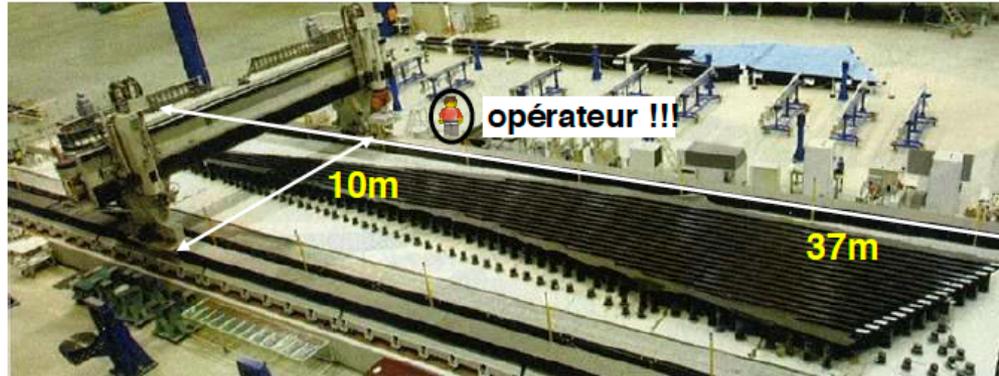


débit d'eau : 13 l/min
débit d'abrasif : 2 kg/min
vitesse d'avance \approx 1 mm/min

acier inoxydable



DÉCOUPE 2D À FAÇON



Ébavurage de panneaux d'aile de boeing 787 (composite stratifié)

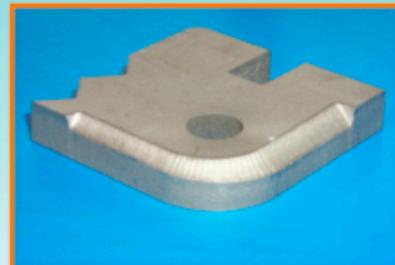
- machine de 37m par 10m,
- table asservie par 342 actionneurs pour s'adapter à la forme de la pièce et à la position du jet,
- ébavurage d'une aile en 0,5 jour soit un gain de temps de plus de 50% par rapport au fraisage,
- l'utilisation du jet d'eau au lieu du fraisage permet d'éviter les gros problème de délaminage lors de l'ébavurage.

GÉOMÉTRIE EN 2D



DÉCOUPE 3D AVEC ABRASIF

- Découpe avant soudage
- Découpe de turbine
- Chanfreinage
- Découpe de tube
- Détourage
- Principaux utilisateurs
 - Industrie aéronautique
 - Industrie automobile



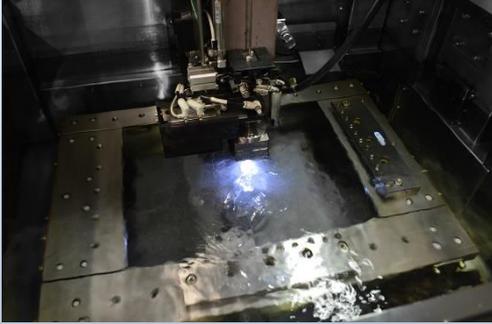
AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

- applications diverses et grande adaptabilité,
- découpe de (presque) tous les matériaux,
- pièces finies, sans opérations supplémentaires,
- pas de Zone Affectée Thermiquement,
- pas de contraintes mécaniques ou de micro-fissures,
- grande précision, y compris sur les fortes épaisseurs,
- un seul outil pour tous les matériaux,
- un seul outil pour toutes les opérations (découpe, perçage, contournage).

- procédé bruyant,
- traitement des déchets (boues d'abrasif),
- correction des défauts délicate sur fortes épaisseurs.

Procédés de découpe

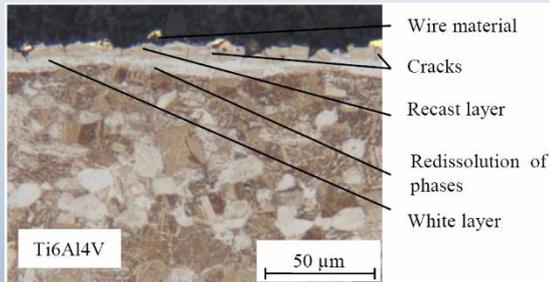
Electro-érosion à fil



Produit



Matériau

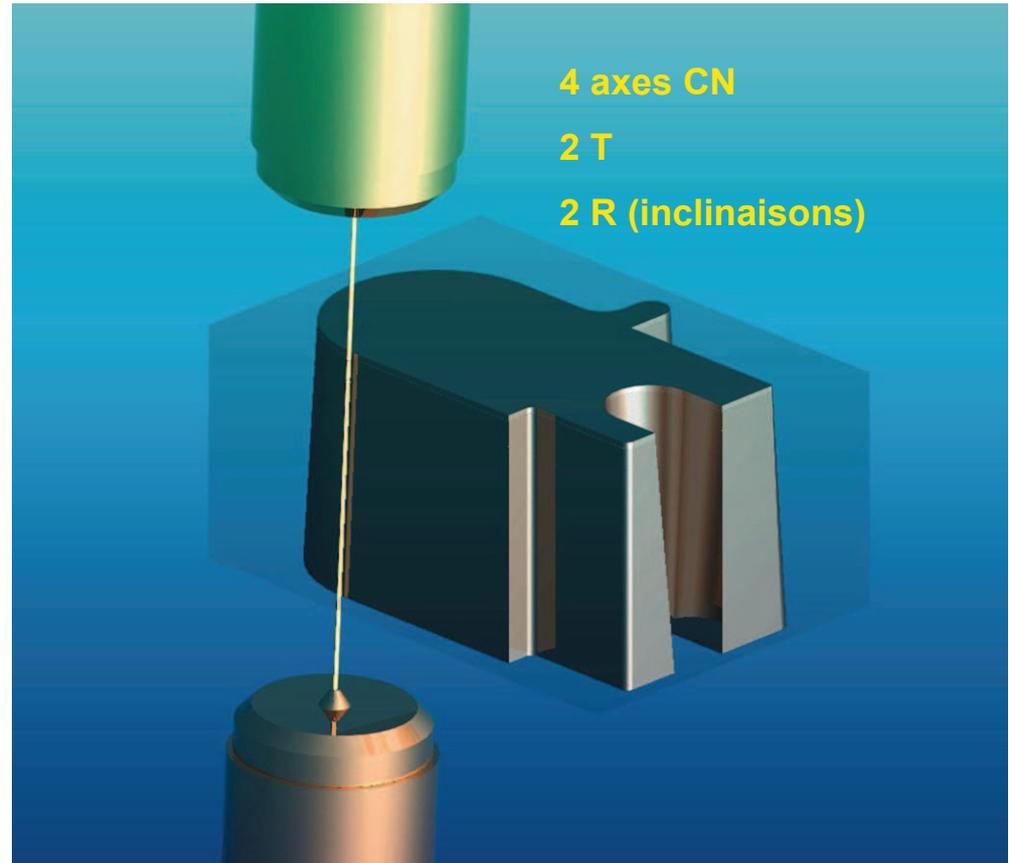


Procédé



PRINCIPE DE LA DÉCOUPE PAR FIL

- simplification géométrique de l'outil,
- géométries complémentaires outil/pièce,
- pilotage par CN 4 axes
- limitation : procédé de découpe.



PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ

Les caractéristiques techniques du procédé sont différentes du défouçage :

- énergie des impulsions plus faible,
- Ra de 2-5 μm en ébauche à 0,1 μm en super finition,
- précision géométrique de quelques μm sur des épaisseurs d'environ 100mm.

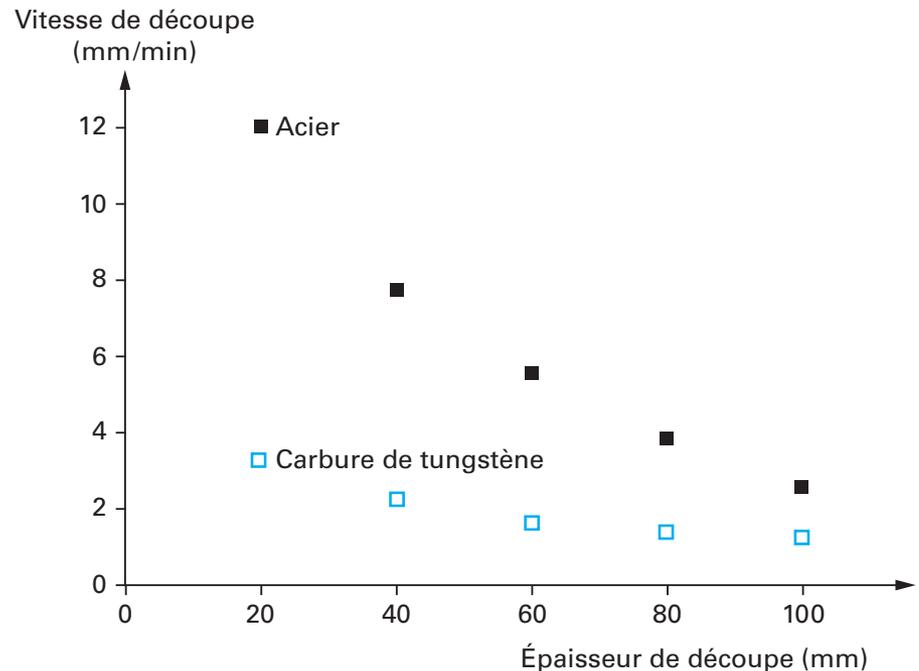
Les caractéristiques des matériaux pour le fil sont :

- haute résistance à la traction (limite élastique et à rupture),
- haute conductivité électrique,
- basse température de fusion,
- basse température de vaporisation.

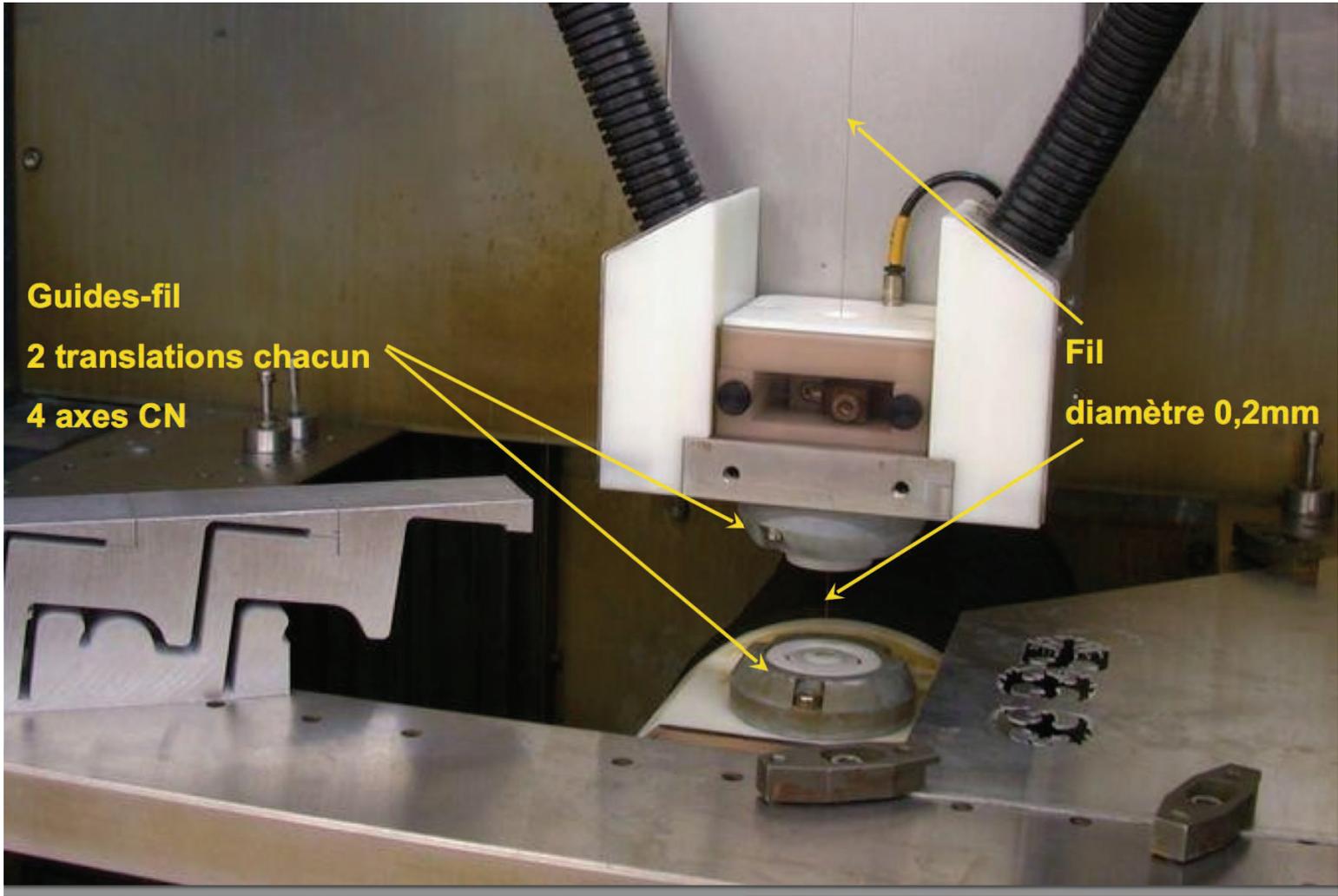
PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ II

Pour des raisons technologiques, on préfère que le matériau du fil soit vaporisé plutôt que fondu (il est plus facile d'évacuer un gaz que des particules solides dans l'espace restreint produit par la saignée).

La vitesse d'avance dépend des caractéristiques du matériau découpé et de son épaisseur :



TECHNOLOGIE DES MACHINES



Guides-fil

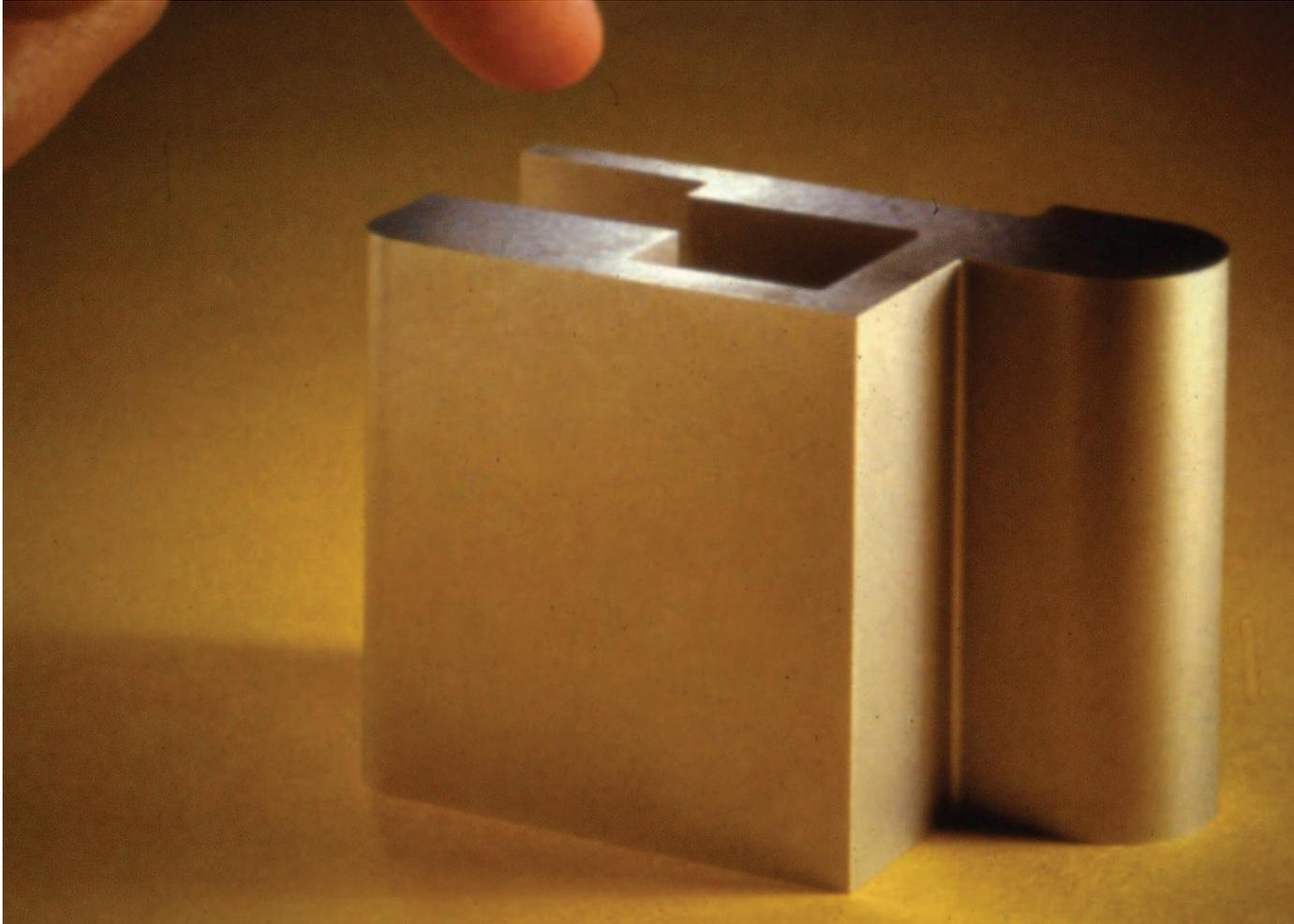
2 translations chacun

4 axes CN

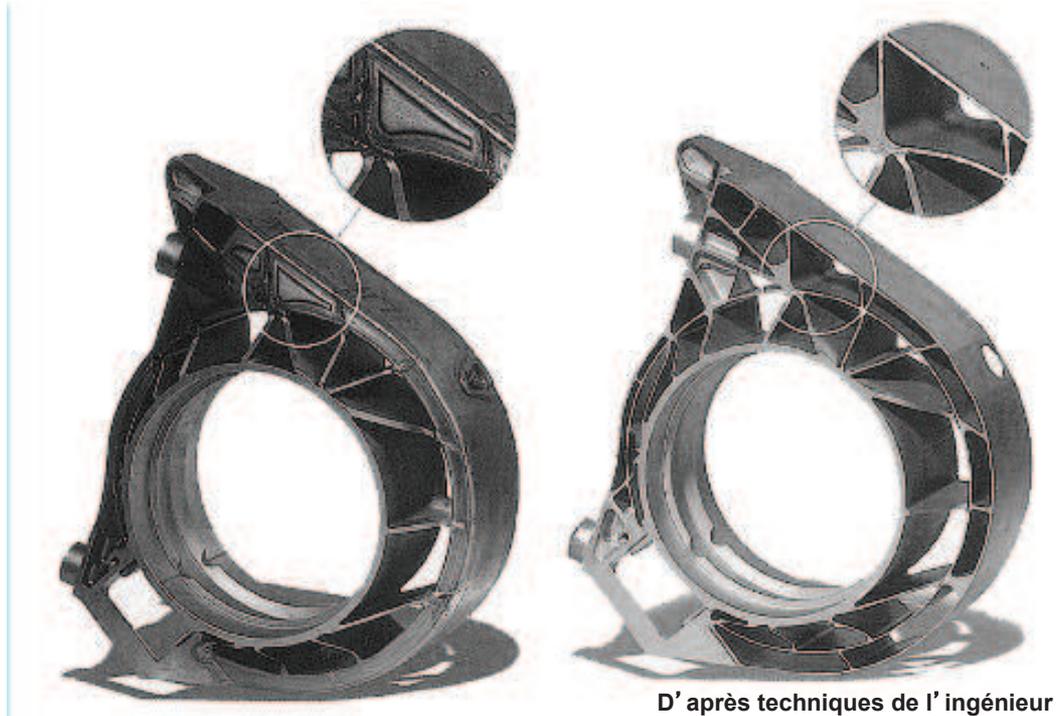
Fil

diamètre 0,2mm

EXEMPLES DE PIÈCES



EXEMPLES DE PIÈCES



Porte moyeu arrière de formule 1 en titane. La découpe fil (40h) remplace l'usinage de 10 pièces et leur soudage à l'aide d'un gabarit dont le montage est très complexe (60h). La pièce fabriquée est plus légère et plus résistante.

Procédés de découpe

Découpe laser



Produit



Matériau

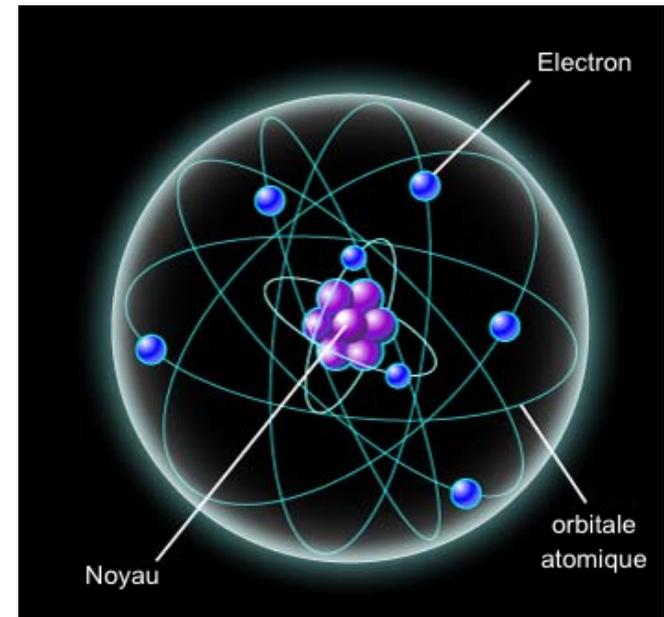


Procédé



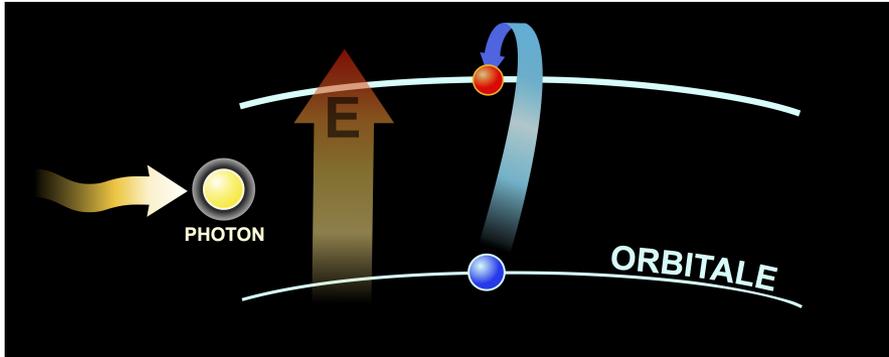
ATOMES ET NIVEAUX D'ÉNERGIE

- 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.

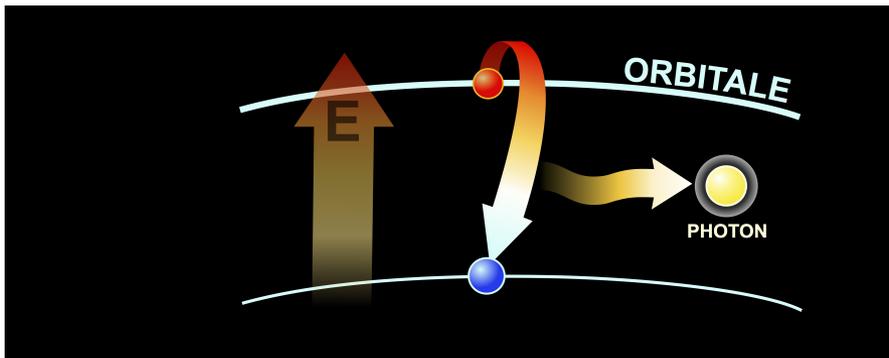


INTERACTIONS LUMIÈRE / MATIÈRE I

Deux phénomènes de base peuvent être envisagés :



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

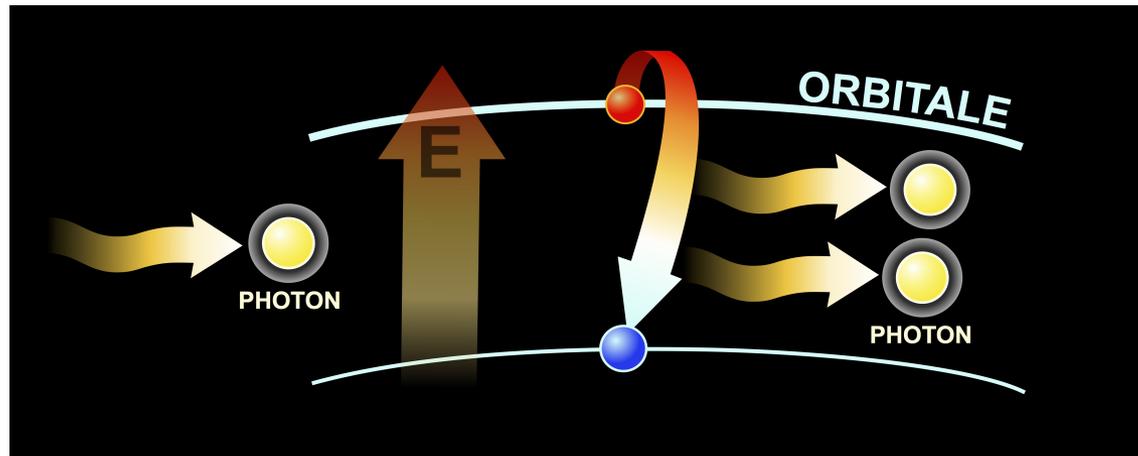


- **Emission spontanée** : un atome dans un état d'énergie élevé émet ($E_2 \rightarrow E_1$) un photon de direction et phase quelconque.

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

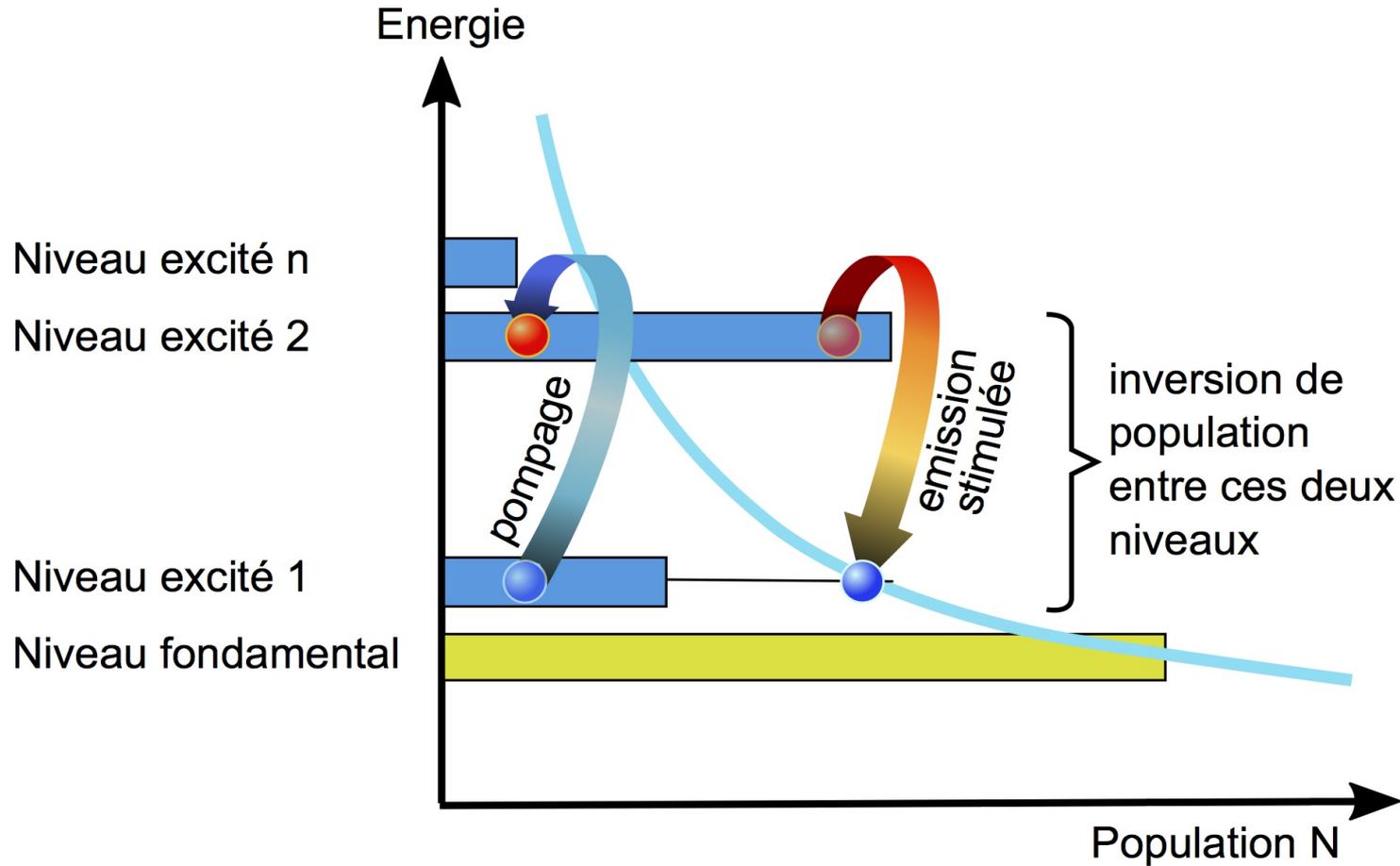
INTERACTIONS LUMIÈRE / MATIÈRE II

Au début du XX^{ème} siècle, Einstein a montré l'existence d'une 3^{ème} 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.

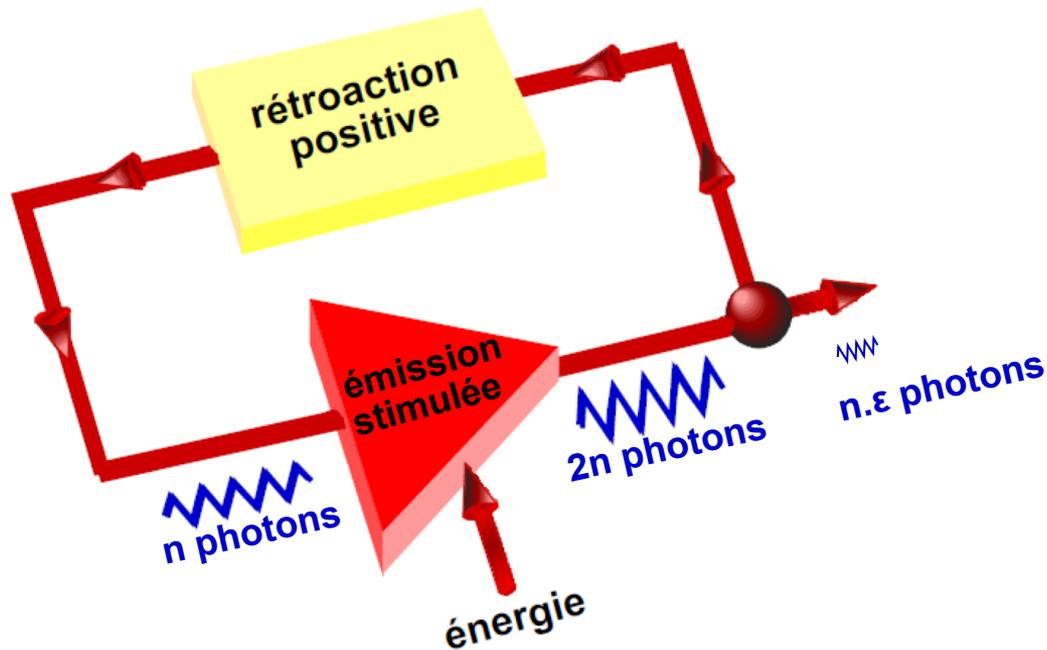
EMISSION STIMULÉE : CONDITIONS NÉCESSAIRES ?



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



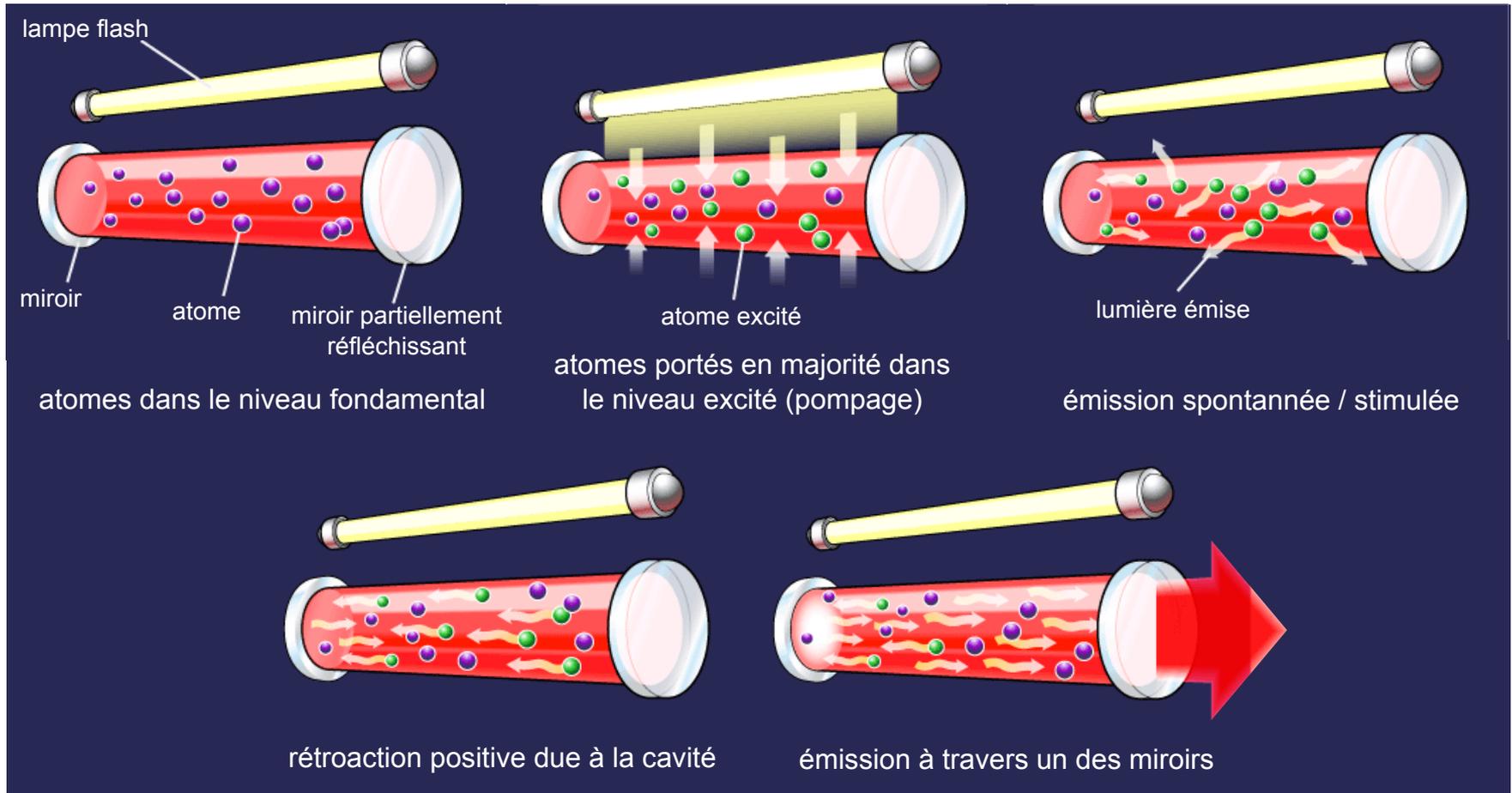
Propriétés du faisceau :

- 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).

RÉSUMÉ



BILAN : MILIEU AMPLIFICATEURS ET POMPAGE

Milieux 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 μW à quelques dizaines de kW (sources industrielles).

Durée d'émission.

- du continu à 10^{-15}s .

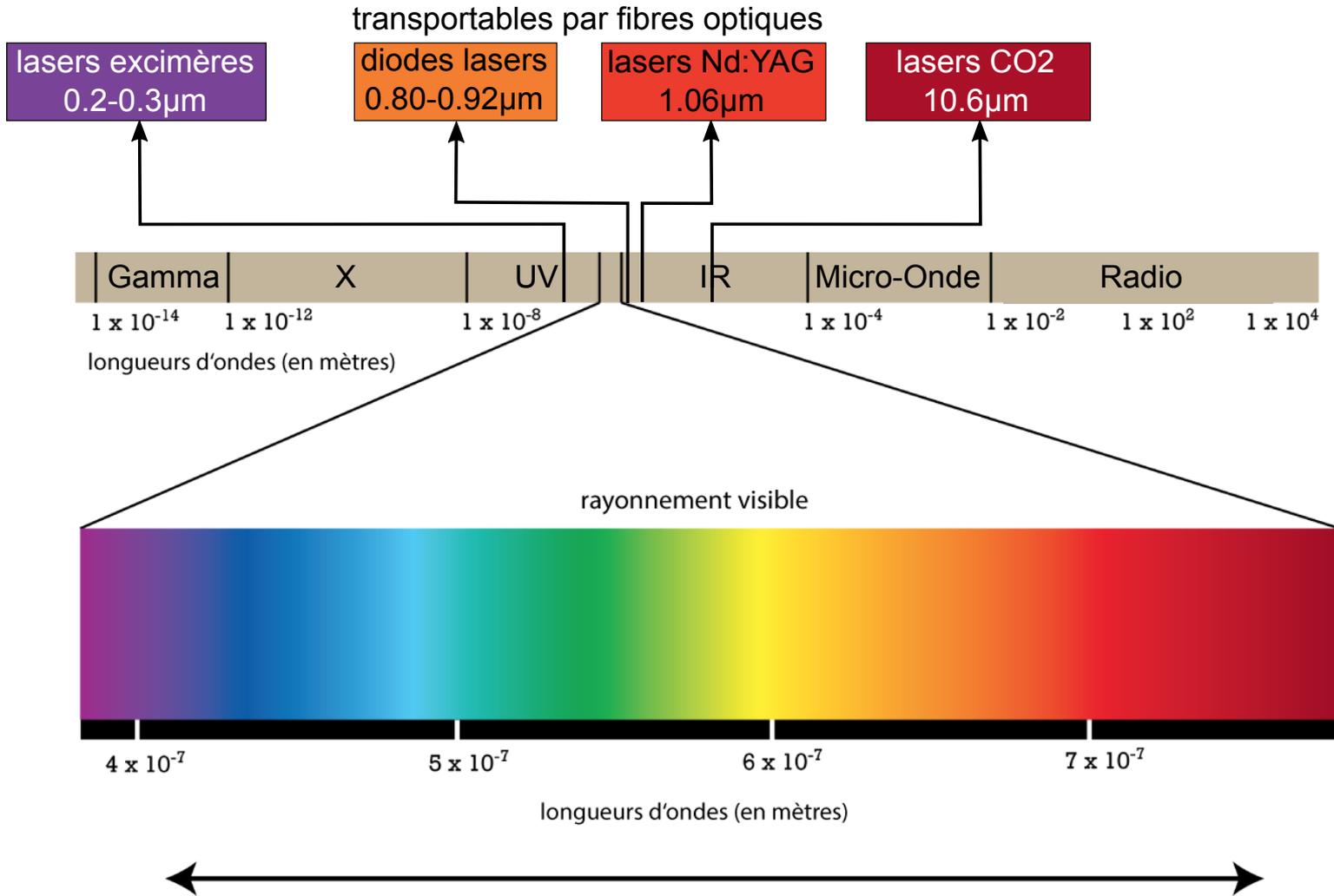
Energie par impulsion.

- du mJ à quelques dizaines de J.

Deux douzaines de lasers industriels.

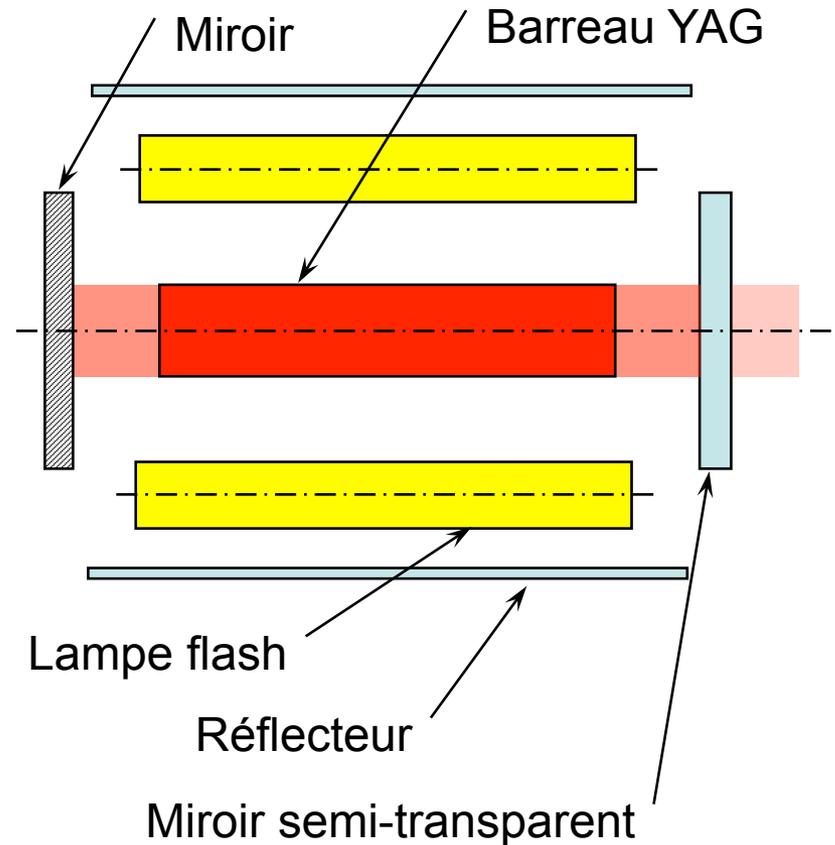
→ Lasers de puissance **P > 100W.**

SOURCES DISPONIBLES



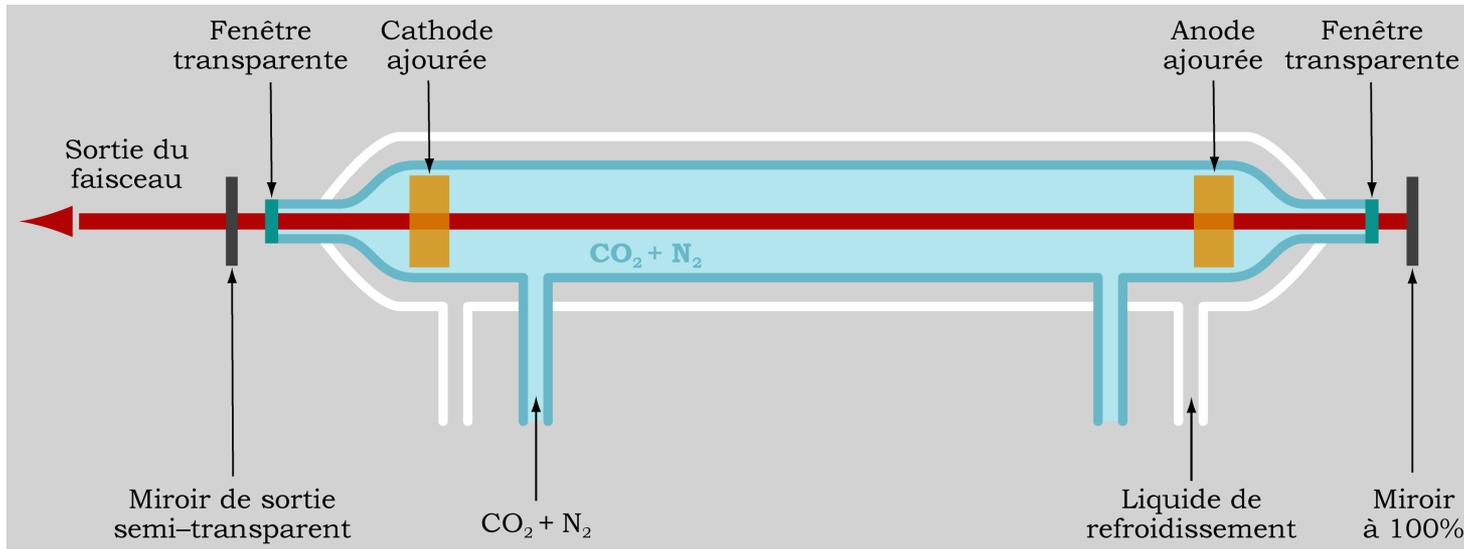
LASER YAG - ND II

- 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).



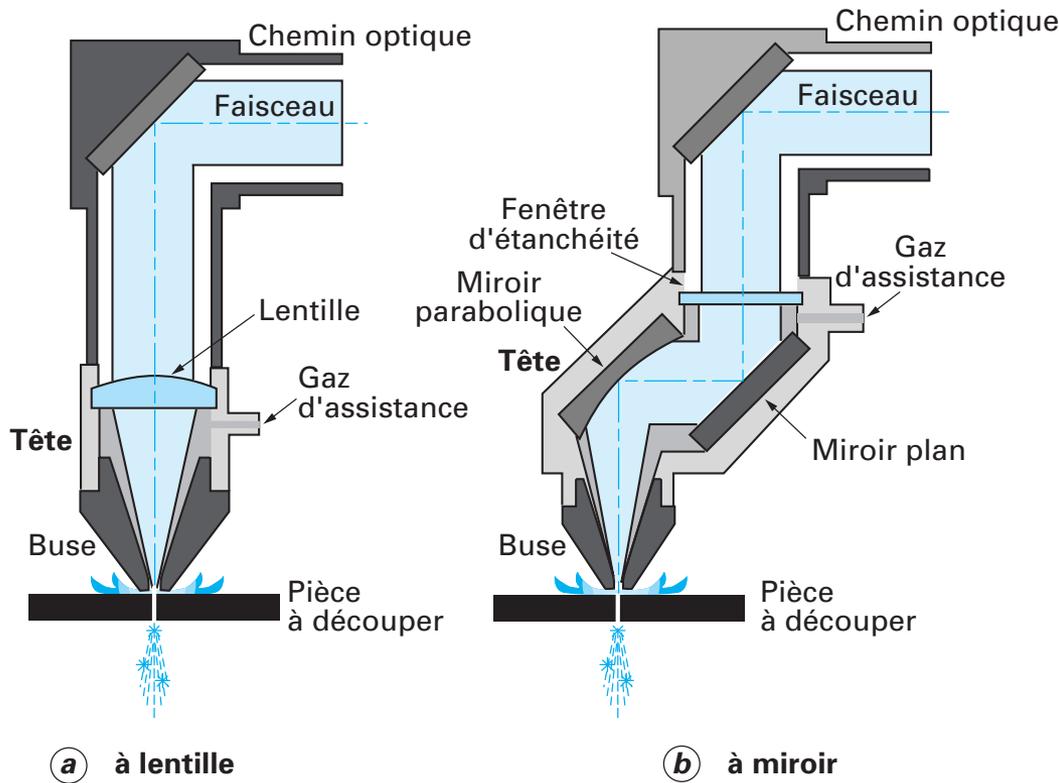
LASER CO₂ II

- 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).



UTILISATION DE LA PUISSANCE

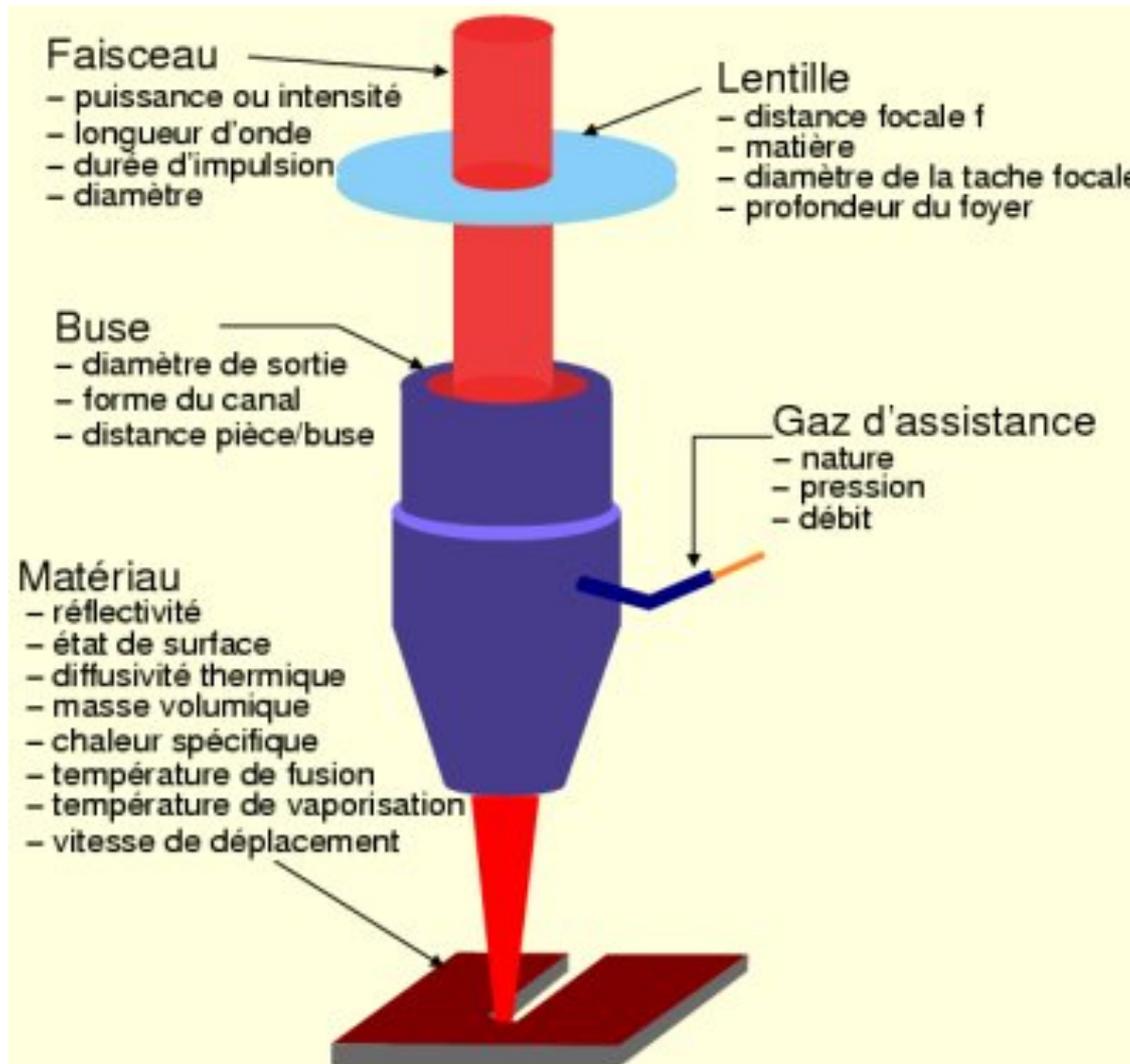
- Densité de puissance 10^3 à 10^9 W/cm² → focalisation.
- Transport du faisceau de la source vers la machine utilisatrice.



Matériaux optiques :

- YAG : verres fibres, lentilles.
- CO₂ : lentilles ZnSe, miroirs métalliques.

PARAMÈTRES DU PROCÉDÉ



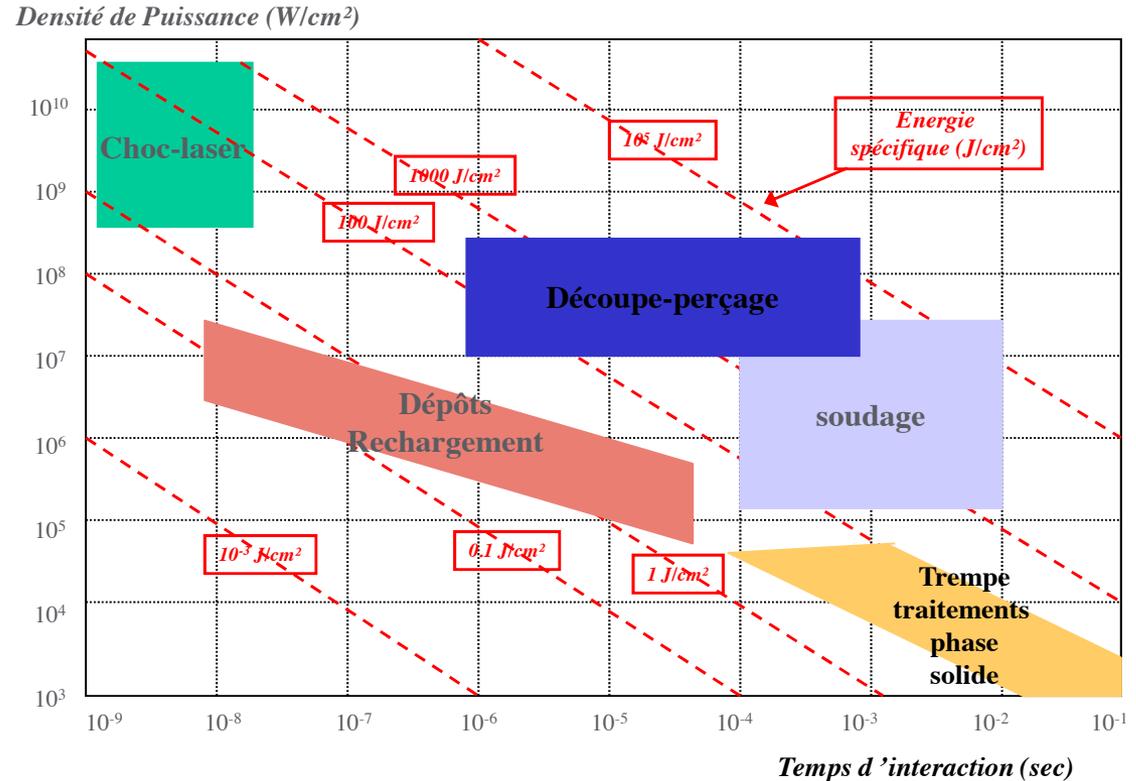
USINAGE

Phénomènes :

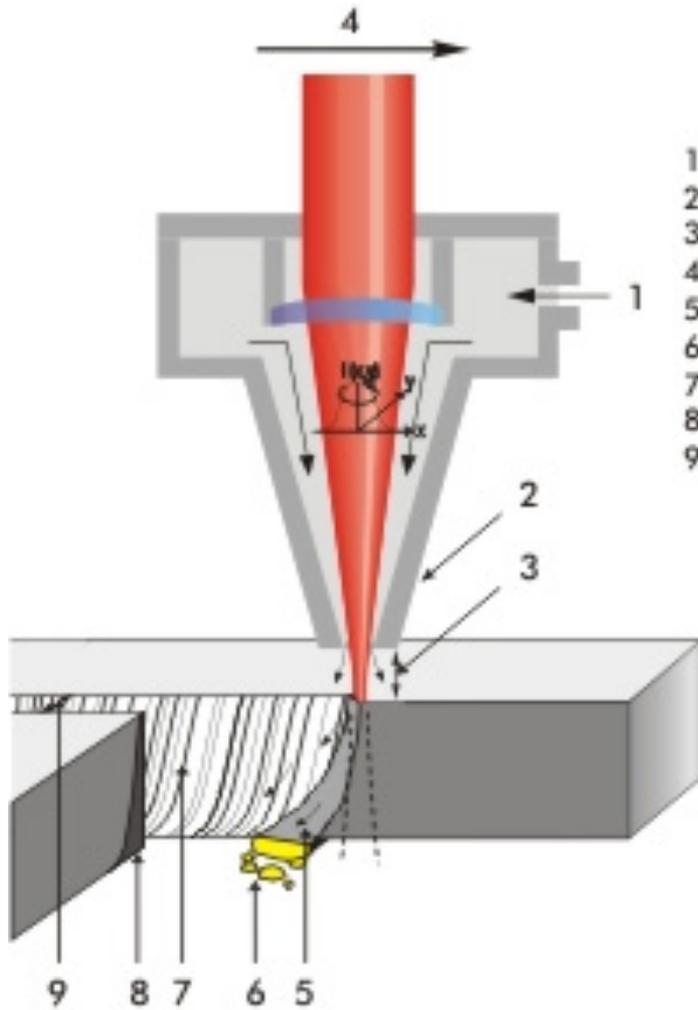
- fusion,
- vaporisation,
- dégradation thermique,
- dégradation photochimique.

Matériaux :

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



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



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



Procédés de découpe - Bilan

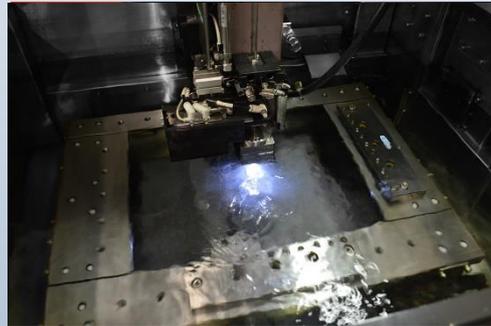
Découpe par jet d'eau
abrasif

Waterjet cutting



Electro-érosion à fil

Wire EDM

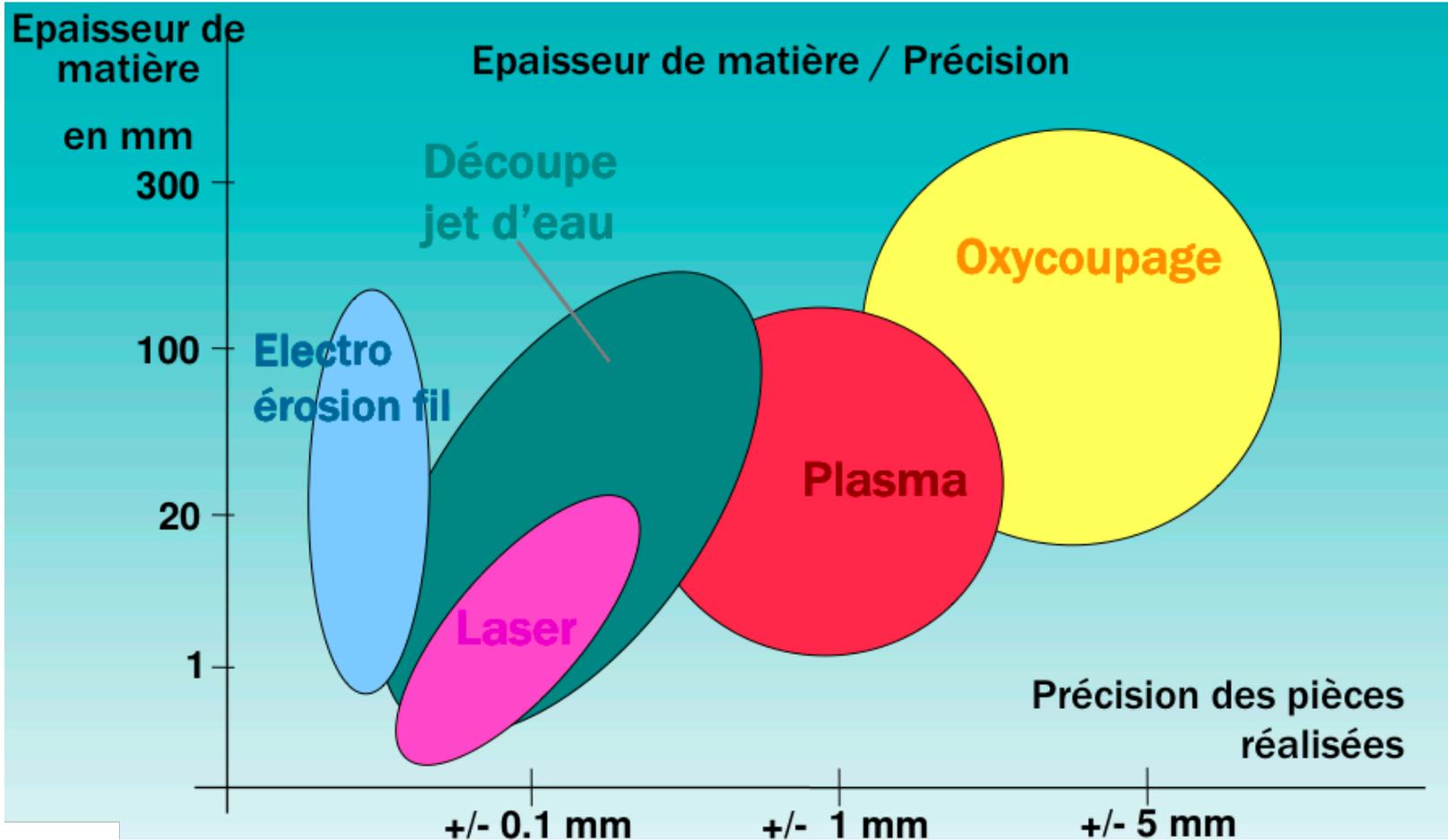


Découpe laser

Laser cutting



PRÉCISION DU PROCÉDÉ



DÉCOUPE III

	Laser CO ₂	Laser YAG	Jet d'eau	Oxycoupage	Plasma
Acier	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
Alu	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
Inox	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