

DÉCOUPE de MATÉRIAUX DURS

Florence Robaut



Objectif :

Décrire les techniques de découpe des matériaux durs

(métaux, minéraux, composés durs -céramiques, carbures métalliques, intermétalliques..-)

Caractériser les déformations microstructurales induites (Zone Affectée)

Plan :

1. Procédés de découpes conventionnels :

➤ le sciage

2. Procédés de découpe fine :

➤ la meule de tronçonnage

➤ la scie à fil diamanté

➤ les ultra-sons

3. Procédés de découpe haute énergie

➤ l'électro-érosion

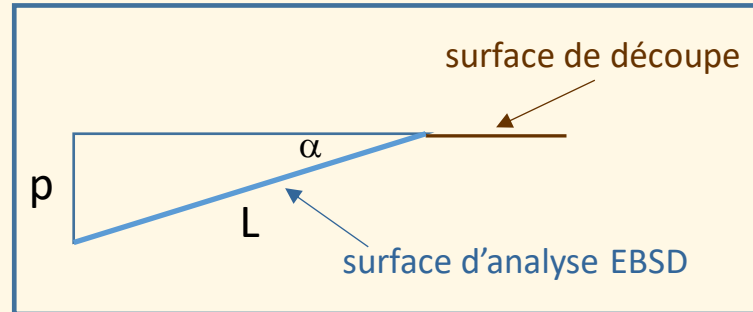
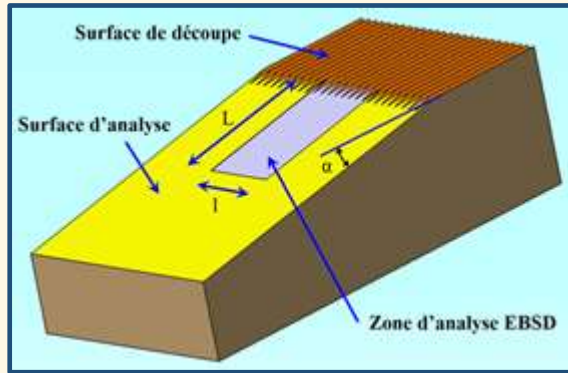
➤ le jet d'eau haute pression

➤ le laser

Non abordés : la fracture, la découpe par microtome

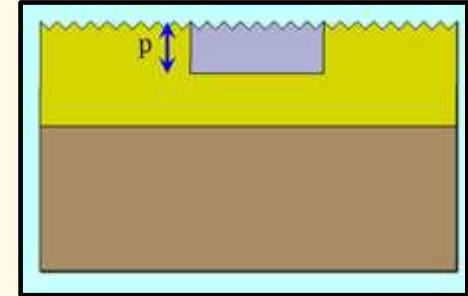


Étude des perturbations microstructurales induites en profondeur



profondeur sondée : $p = L \cdot \sin\alpha$

$\alpha = 5-10^\circ$



Surface d'analyse EBSD :

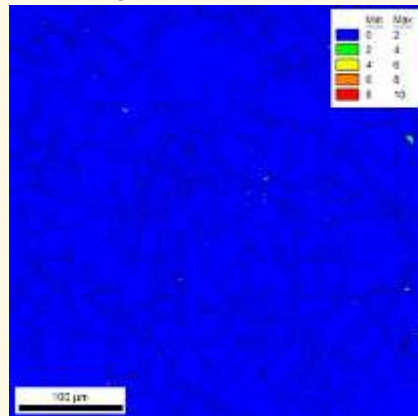
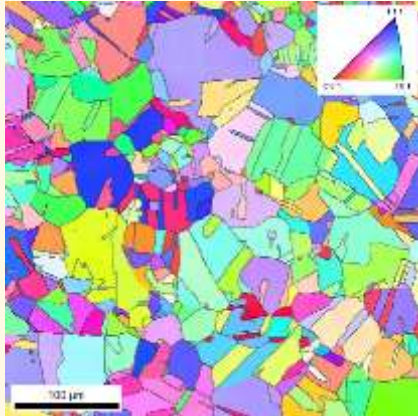
- préparée par polissage mécanique + polissage électrolytique
- non choisie \perp à la surface découpée
- angle de 5° ou 10° avec la surface découpée

Polissage électrolytique :

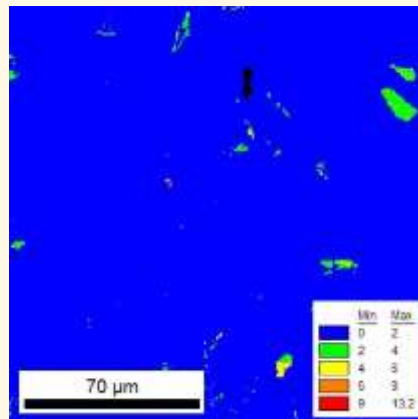
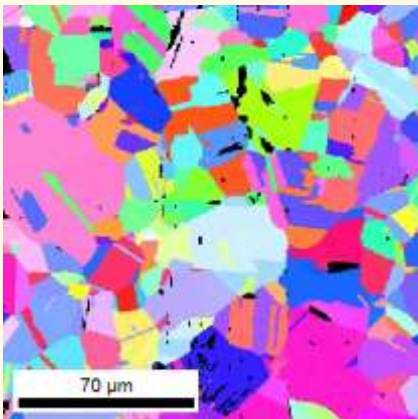
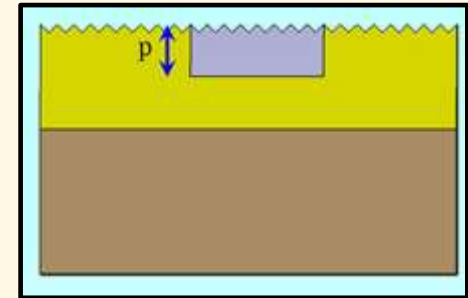
- décape la surface sur prof. ~ 5 à $10 \mu\text{m}$
- épaisseur ajoutée à la prof. ZA par la découpe, mesurée par EBSD

Étude des perturbations microstructurales induites en profondeur

avant découpe :



Ni polycristallin recristallisé



Acier 304 L
(austénite cfc + ferrite cc minoritaire)

cartographie d'orientation des grains

cartographie des désorientations
intra-granulaires

Echantillons analysés :

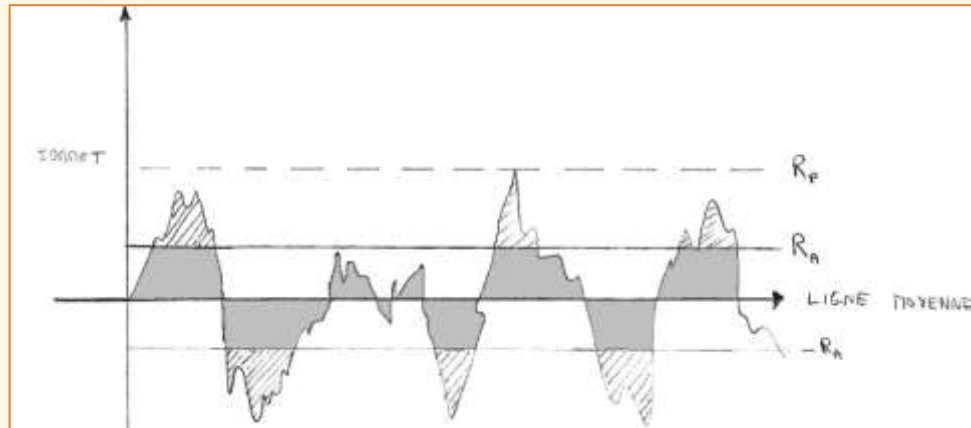
- Ni polycristallin recristallisé
- acier 304 L

▪ avant découpe :
désorientation cristallogr. intragranulaire < 2°

▪ ds. zone proche de la surf. de découpe :
désorientation attribuée aux perturbations de découpe

paramètre R_a : rugosité moyenne arithmétique :

moyenne arithmétique des écarts de hauteur (en valeur absolue)
par rapport à la **ligne moyenne du profil**



Procédés de découpe conventionnels

Procédés de découpe conventionnels ateliers de mécanique



OBJECTIF :

- ◆ Prélèvement de matière dans un échantillon volumineux

👉 zone affectée par la découpe importante

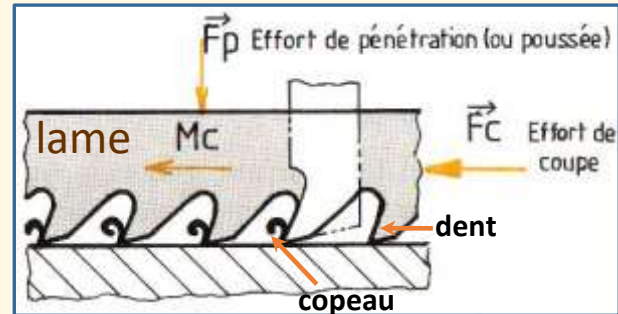
- découpe à effectuer loin de la zone d'intérêt

👉 nécessaire blocage de la pièce ds. système de serrage (ex. étau)

- ➔ effort important non contrôlé
- ➔ dommages mécaniques et thermiques, déformations / modifications de la microstructure (matériau mou)

SCIAGE :

- ◆ découpe par enlèvement de matière (copeaux) à l'aide d'un outil (lame) pourvue de dents (la denture)

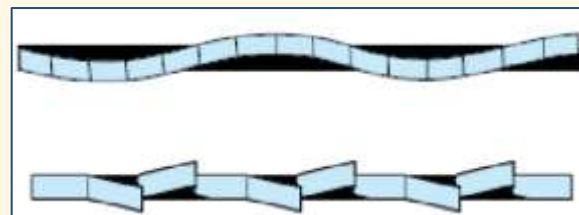
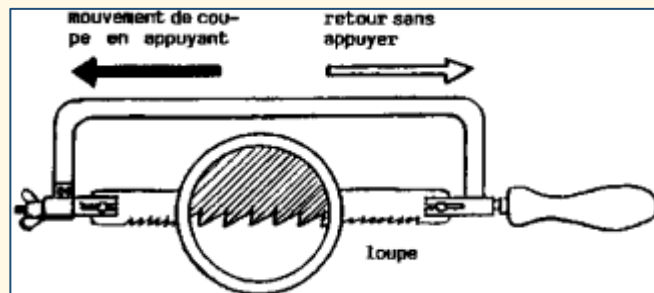


SCIE ALTERNATIVE (mécanique ou manuelle) :

- utilise une lame droite au mouvement alternatif
- effort de coupe à l'avance de l'outil
- pression sur la lame relâchée au retour
- éviter blocage de la lame dans la coupe :
 - par avoyage de la denture
 - par ondulation de la lame ou écartement des dents



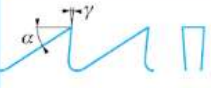
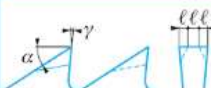



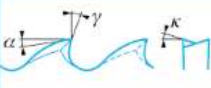
- ne permet pas de prendre des précautions vis-à-vis de la pièce
- pièce dans étau d'établi
 - mauvaises cond⁰ de maintien de qualité de coupe



scie alternative Beka-Mak

SCIE CIRCULAIRE (mécanique ou manuelle) :

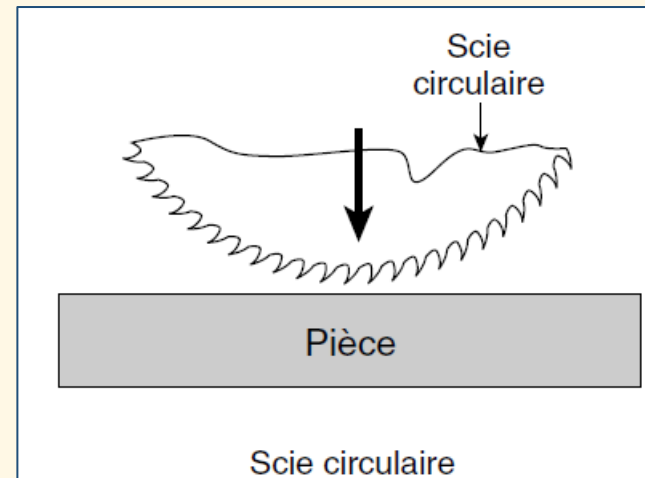
- utilise une lame circulaire

Profil	Type	Abréviation	Application
	Droite couchée	A	Matériaux minces Rainurage peu profond
	Droite ACMÉ	Aw	Rainurage peu profond
	Simple ou crochet	B	Rainurage
	ACMÉ	Bw	Tubes et profilés minces
	Heller ou Cochrane	C ou HZ	Tubes et profilés forte section
	Alternée	CNS	Profilés minces acier et non ferreux

α angle de dépouille γ angle de coupe κ angle d'inclinaison d'arête

Ⓐ en acier rapide monobloc

différentes formes de dentures de scies circulaires

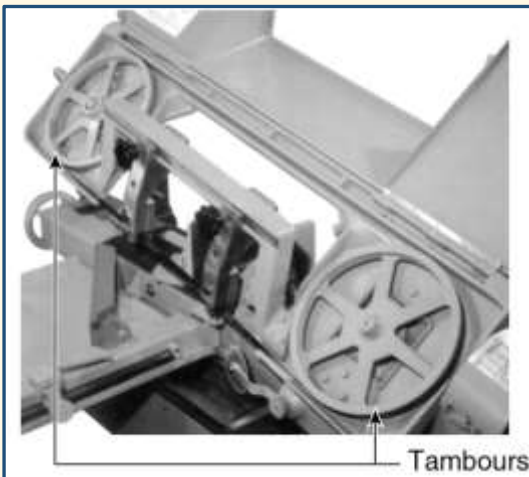
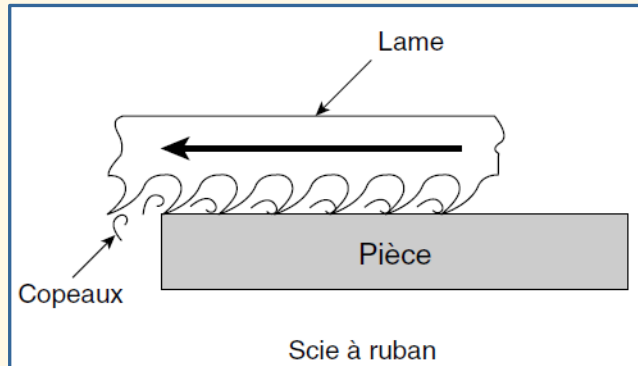


Procédés de découpe conventionnels ateliers de mécanique

Scie à ruban

SCIE A RUBAN :

- lame de scie fermée tendue entre 2 tambours
- animée d'un mvt. continu de rotation
- pression de coupe assurée par :
 - un contrepoids ou
 - un système d'avance mécanique

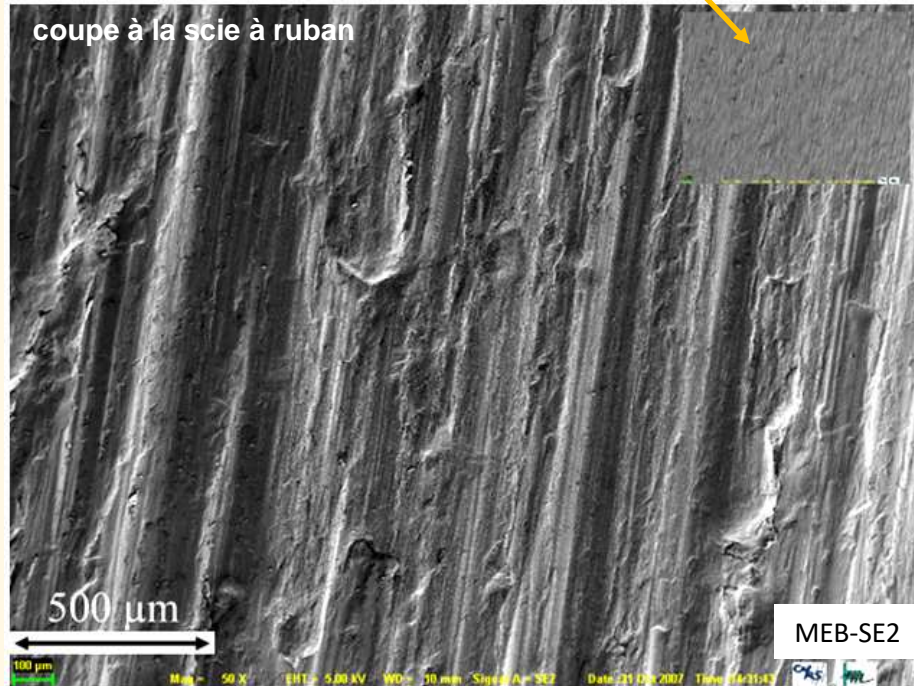


CARACTÉRISATION de la ZONE AFFECTÉE par la SCIE à RUBAN :

◆ Echantillon de nickel :

coupe à la scie à fil diamantée
(même échelle)

coupe à la scie à ruban



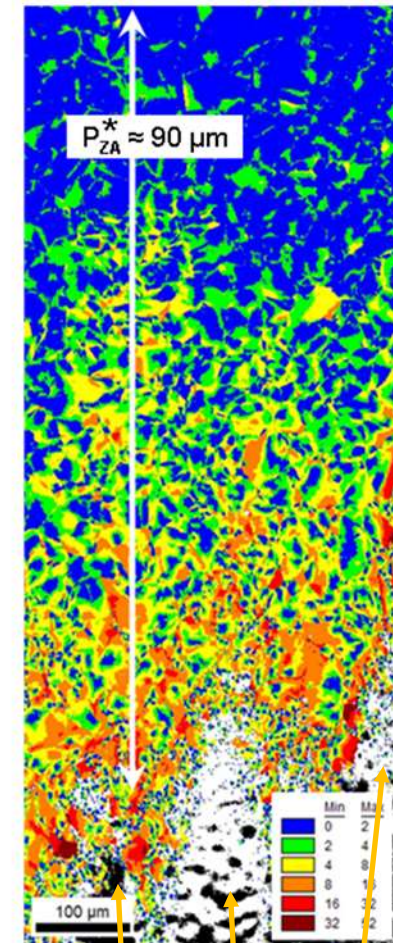
rugosité, tartinage de matière sur la surface découpée

Prépa. EBSD : papier SiC → granulométrie 4000 (5 µm)
+ polissage électrolytique

cartographie d'orientation des grains



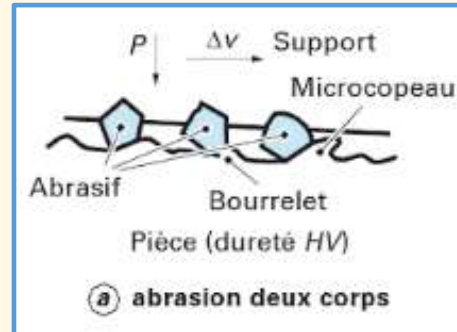
cartographie des désorientations
intra-granulaires



traces des stries de la lame de scie à la jonction entre
les surfaces d'analyse et de coupe

angle α surface d'analyse/surface de découpe = 5°

Procédés de découpe de précision



PRINCIPE :

- ◆ enlèvement de matière par abrasion mécanique
- ◆ procédé d'abrasion 2 corps :
 - grains abrasifs du support en mvt. contre la pièce (Pression)
 - glissement des grains
 - enlèvement de micro-copeaux
- ◆ fil, scie de précision :
 - qualité et finesse de coupe
 - minimisation des dégâts mécaniques engendrés
 - coupe proche de la région d'intérêt en minimisant les dommages

TRONÇONNAGE ABRASIF :

- ♦ dim. échantillon > 50 mm
- ♦ meules : Al_2O_3 ou SiC (le \oplus souvent)
liant résine, gomme ou Cu
- ♦ découpe rapide



TRONÇONNAGE de PRECISION :

- ♦ dim. échantillon < 50 mm
- ♦ meules fines : Al_2O_3 , SiC ,
diamant , BN
- ♦ positionnement précis de la coupe
- ♦ trait de coupe fin



meule de \oplus grand \emptyset → coupe d'éch. de \oplus grandes dim.
→ épaisseur de meule \oplus élevée
→ plus de déformation

meule de \oplus petit \emptyset → meule \oplus fine
→ moins de déformation

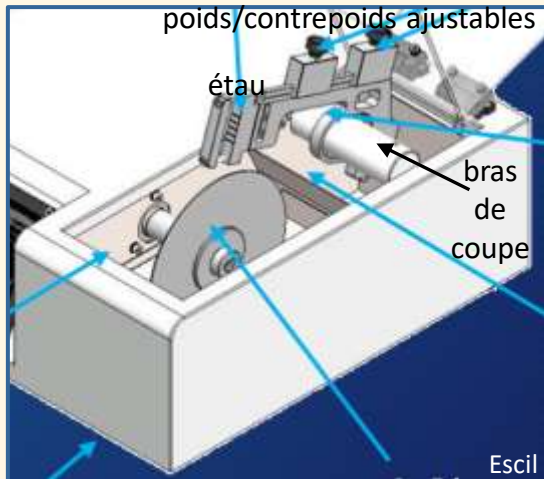
Procédés de découpe fine - équipement de laboratoire

PRINCIPE :

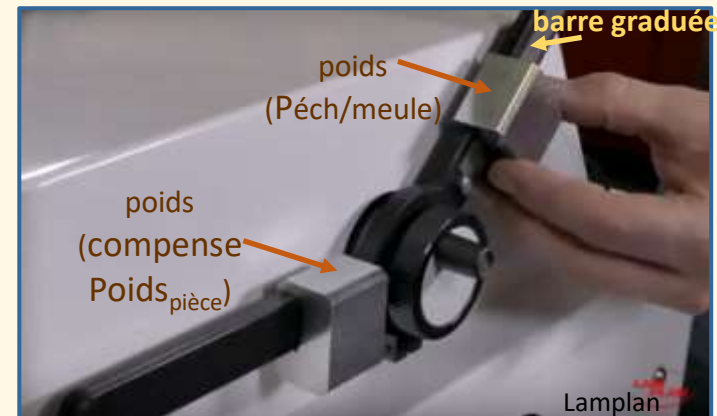
- ◆ meules de tronçonnage \varnothing 75 - 200 mm
- ◆ maintien de la pièce : bras porte-étaux
 - déplacement micrométrique du bras
- ◆ avance de coupe :
 - linéaire (meule ou table)
 - par gravité (syst. de poids/contrepois) (⊕ souvent)
balancier compense Poids_{pièce}, un autre règle la charge appliquée
- ◆ fluide de tronçonnage : lubrifiant meule/éch., ↓ chaleur générée, évacue copeaux, film inhibiteur de corrosion sur meule et éch.
- ◆ éch. fragiles peuvent être enrobés avant découpe



- Paramètres de coupe :**
- selon éch. (nature, dim., ..)
 - meule (nature, \varnothing , ép.,...)
 - position éch./ surf. de contact
 - pression/charge (effort de coupe)
 - vit. rotation meule
 - vit. d'avance
 - qualité de la lubrification



Tronçonnage de précision



Tronçonnage de précision

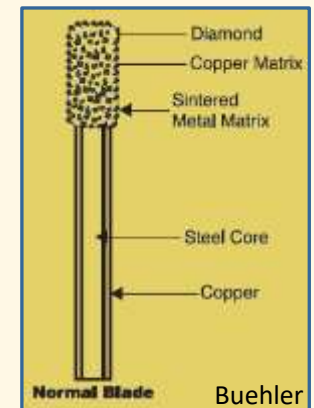
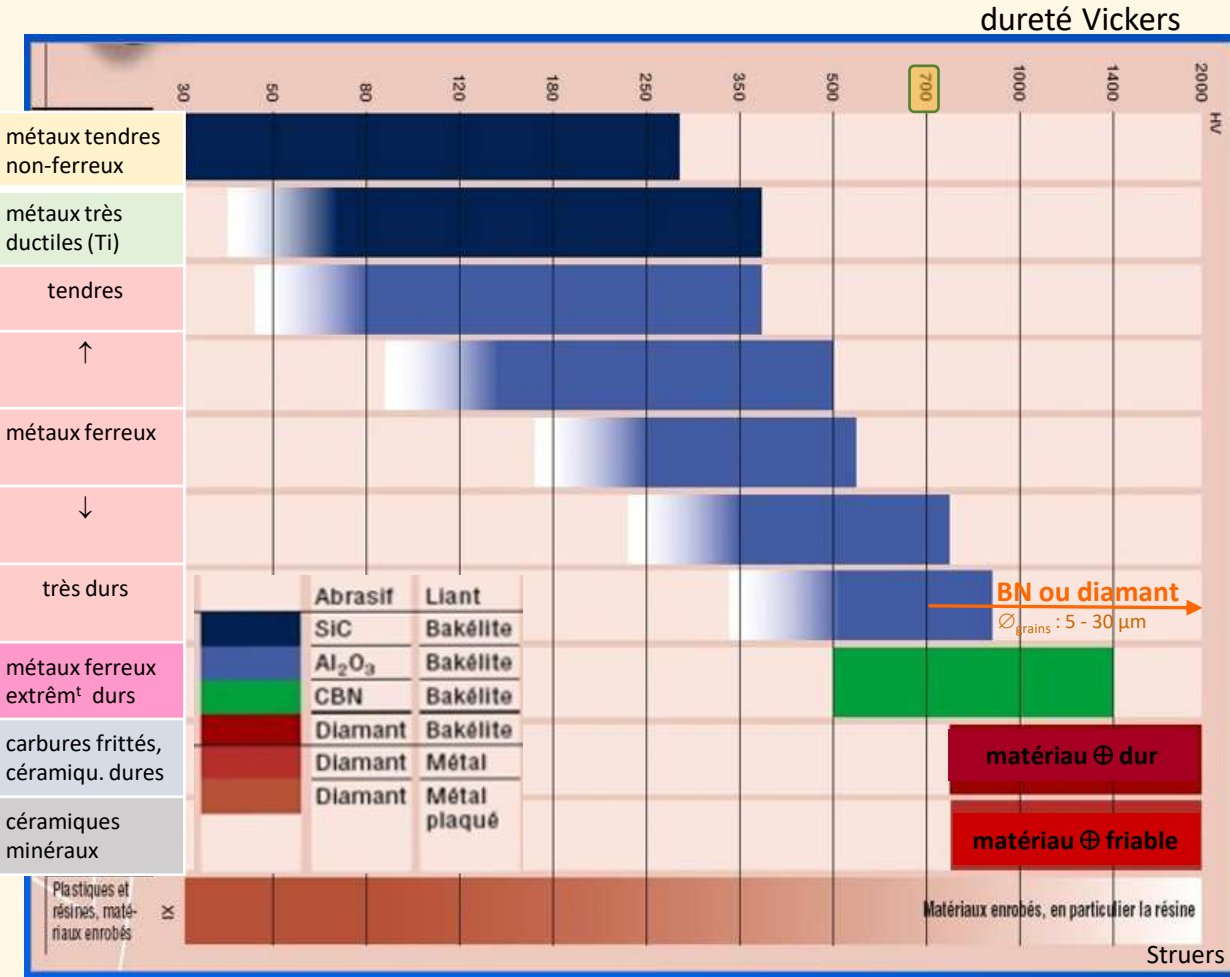
Choix de meules

Pour une coupe efficace et nette :

meule doit s'user suffisamment pour libérer des grains abrasifs frais et coupants
 → le liant de la meule doit être ± tendre :

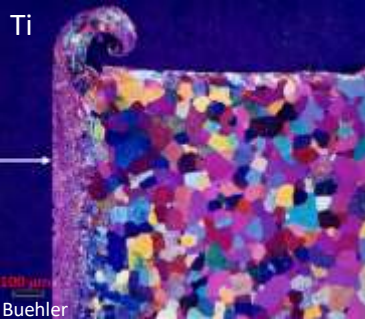
☒ matériau dur → liant tendre
 → renouvellement rapide de l'abrasif

☒ matériau mou → liant dur car capacité de coupe de l'abrasif conservée
 ⊕ longtemps

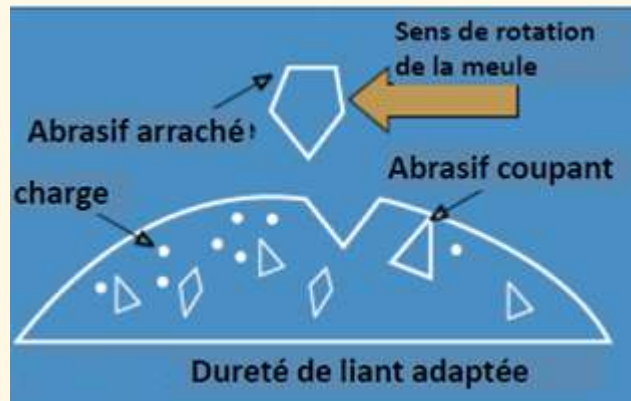
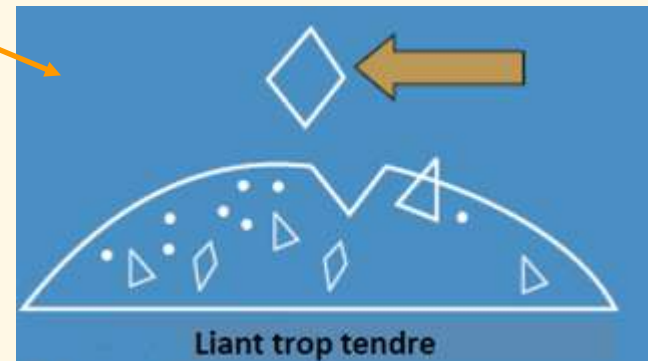
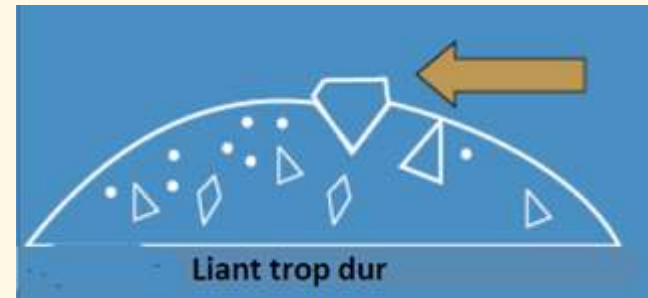


diamant/BN maintenu ds. alliage fritté brasé au bord de la meule acier plaqué Cu (minimise la corrosion)

image optique (réactif de Weck)



Problème	Origine
face polie bleutée : éch. brûlé	refroidiss ^t insuffisant, avance trop rapide, liant meule trop dur
résistance à la coupe	rafraîchissement de l'abrasif trop lent liant meule trop dur
glaçage de la meule abrasif s'arrondit, s'écrouit	liant meule trop dur
usure rapide de la meule	avance trop rapide, liant meule trop tendre

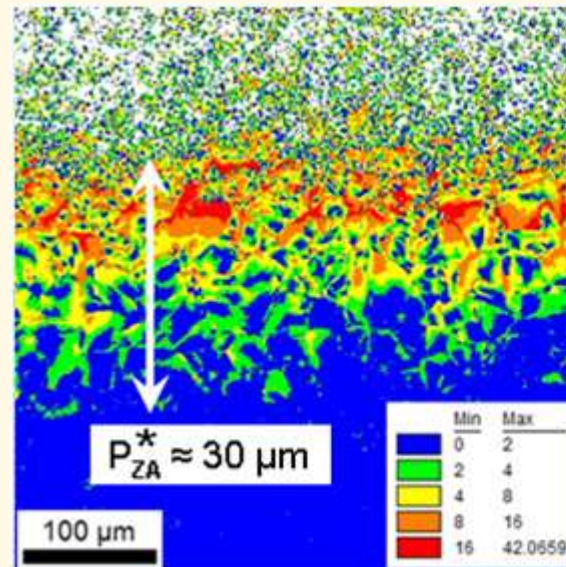


meilleure performance de coupe

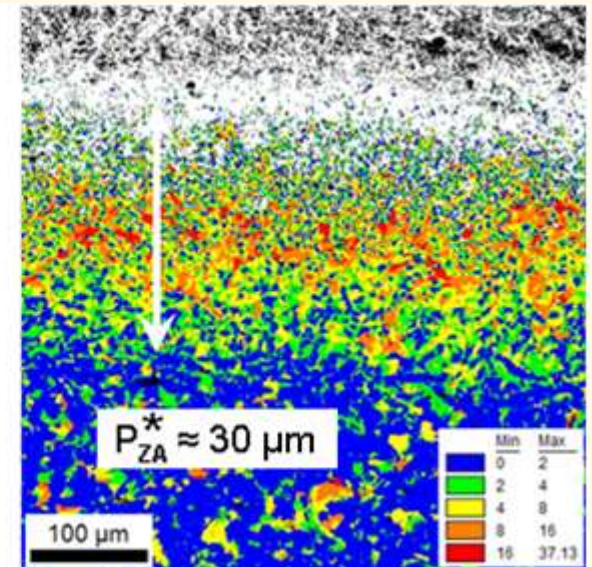
CARACTÉRISATION de la ZONE AFFECTÉE par TRONÇONNAGE MEULE CBN :

Préparation en vue de l'EBSD :
papier SiC jusqu'à granulométrie 4000 (5 µm)
+ polissage électrolytique

cartographie des désorientations intra-granulaires



Ni



acier 100C6

perturbations sur
une faible profondeur

angle α surface d'analyse/surface de découpe = 5°

CARACTERISTIQUES :

- ♦ ép. meule : min. 0,15 mm
- ♦ vit. de rotation de la meule : 50 à 5000 tr/min
- ♦ capacité de coupe : 50mm x 50 mm, \varnothing 50 mm
- ♦ vitesse de tronçonnage : 5 mm/min. (\rightarrow 25 mm/min)
- ♦ précision de coupe : 30 μ m

- ♦ trait de scie (largeur de la rainure) à peine \oplus élevé que \varnothing_{fil} (+10%)

- ♦ épaisseur de l'échantillon à face // : min. 100 μ m



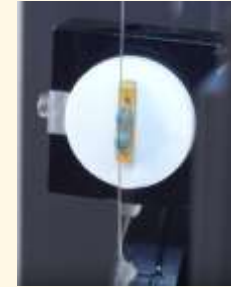
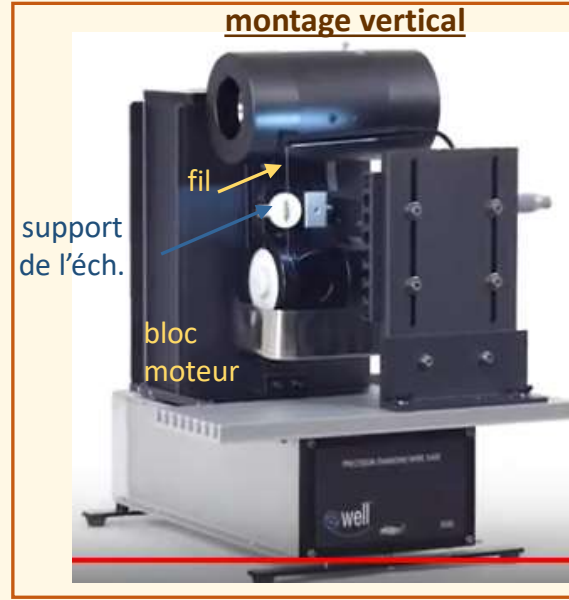
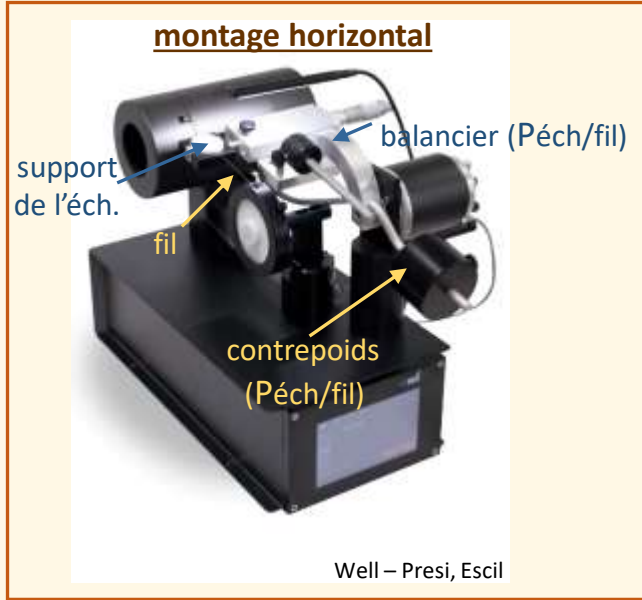
☒ large variété de matériaux, échantillons fragiles, friables,.. :

- circuits imprimés, composants électroniques
- éch. frittés, revêtements
- céramiques, carbures, nitrures
- biomatériaux

☒ excepté diamant

PRINCIPE :

- ◆ fil en boucle, enroulé sur bobine entraînée par un moteur
- ◆ fil tendu grâce à syst. de contrepoids
- ◆ découpe par mouvement alternatif du fil
- ◆ positionnement précis du fil (binoculaire)
- ◆ positionnement précis de la pièce (table micrométrique, goniomètre)



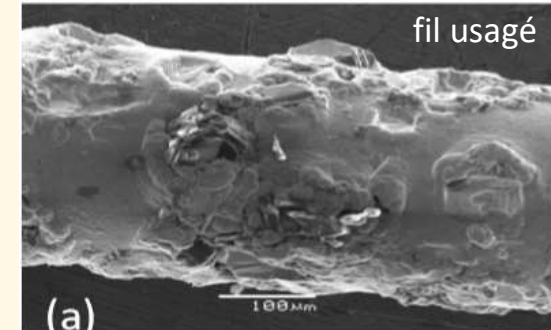
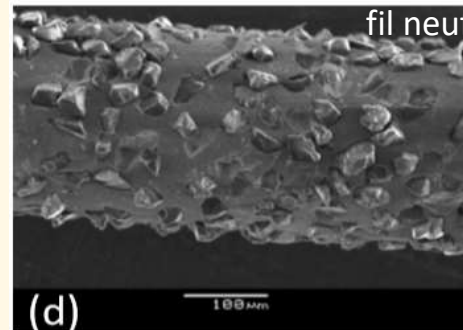
- mécanisme de sciage déplacé contre l'éch
- Pression d'appui par inclinaison de la base de la machine (gravité)

- diamants enchâssés ds. fil acier inox.

Diamètre de fil (mm)	Taille de grain (µm)
0,30	60 et 40

OU

- abrasifs ds. lubrifiant entraîné par le fil



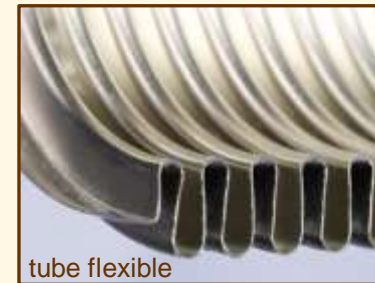
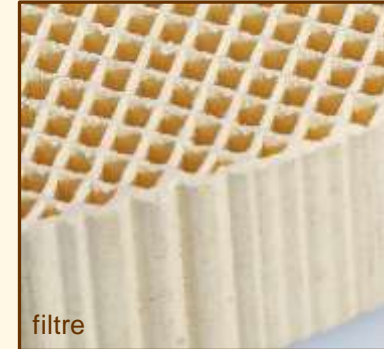
CARACTERISTIQUES :

- ◆ Précision en positionnement sur la pièce
- ◆ vitesse du fil : 5 m/s (valeur max)
- ◆ vitesse d'avance de coupe : qq. $\mu\text{m/s}$
- ◆ trait de scie (largeur de la rainure) à peine plus élevé que \varnothing_{fil}

- ◆ épaisseur de l'éch. obtenu : 200 μm – 300 μm , voire moins

technique au fil diamanté : \oplus douce que celle au disque abrasif
→ coupe d'échantillons très fragiles

En contrepartie : vit. de coupe lente, usure du fil

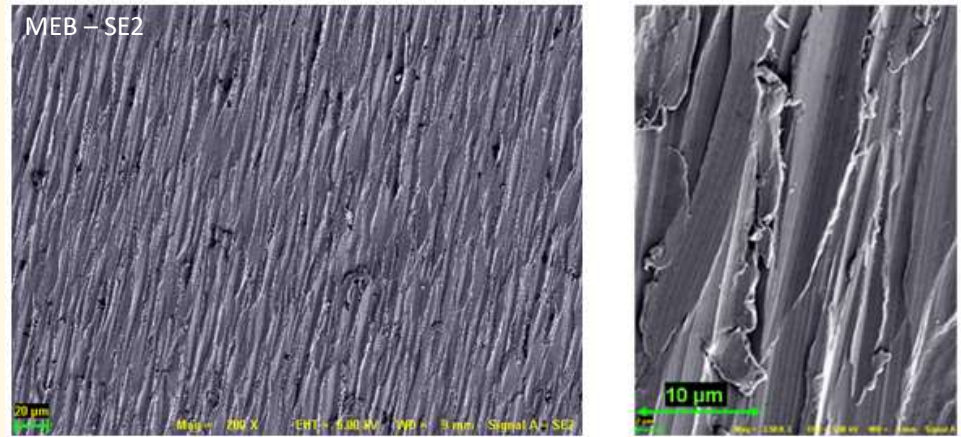


- Large variété de matériaux
- Échantillons délicats: tube à paroi mince, structure en nid d'abeille papier, tôle d'acier émaillée, cristaux fragiles, dépôts fins/substrat

CARACTÉRISATION DE LA ZONE AFFECTÉE par la SCIE à FIL :

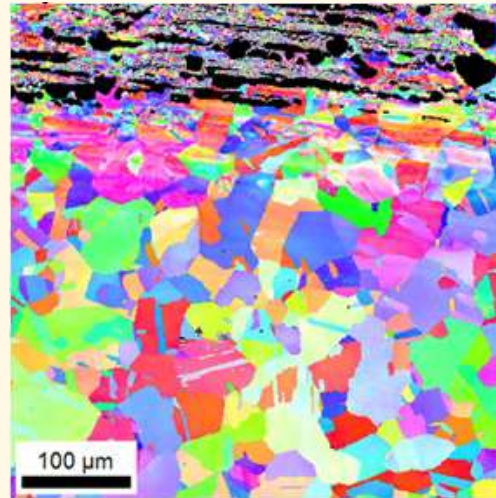
◆ Echantillon de nickel :

Préparation en vue de l'EBSD :
papier SiC → granulométrie 4000 (5 µm)
+ polissage électrolytique

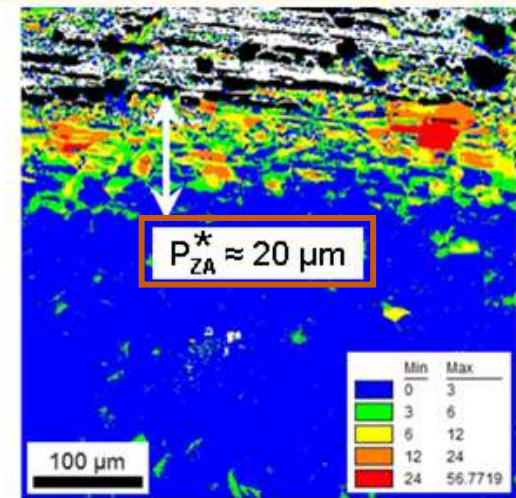


sillons, labourage

perturbations sur
une faible profondeur



cartographie d'orientation des grains



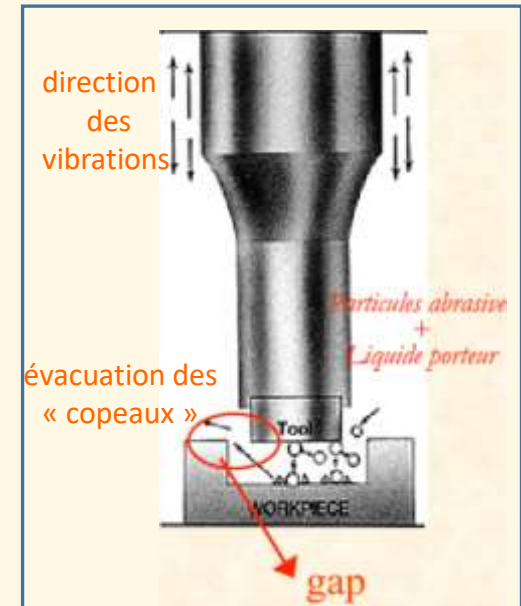
cartographie des désorientations
intra-granulaires

◆ Ech. ds. plaque acier inox (nuance inconnue) : Profondeur $Z_A \sim 20 \mu\text{m}$

angle α surface d'analyse/surface de découpe = 5°

PRINCIPE :

- ◆ grains abrasifs libres contenus ds. suspension (ex. l'eau)
mis en mouvement par un outil (*sonotrode*) oscillant à faible amplitude de vibration (15-50 μm)
à haute fréquence ultrasonore (typiquement 20 kHz)
- ◆ grains abrasifs projetés sur la pièce à usiner
flot constant assure l'évacuation des copeaux et le renouvellement des grains abrasifs
- ◆ Bulles de cavitation de la suspension implosent
→ pressions locales très élevées → microfissures de la pièce
érosion de cavitation due aux variations de P au sein du liquide
- ◆ action mécanique (martèlement par les grains abrasifs)
- ◆ forme de l'outil = imprimée dans la pièce à usiner



J.J. Boy – femto-st

- faible vitesse de découpe : 3-15 mm^3/min
- faible profondeur d'usinage : ($\sim\text{mm}/\text{min}$ verre)
- usure rapide de l'outil

- matériaux durs et/ou fragiles
(carbure, céramique, mat. frittés, verre, graphite, Si,Ge..)

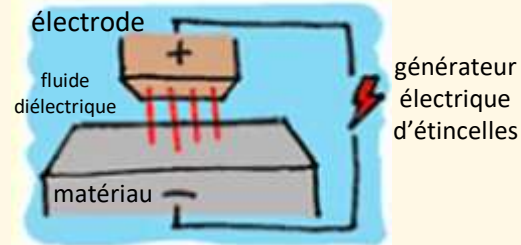


carottage
disques
lames TEM

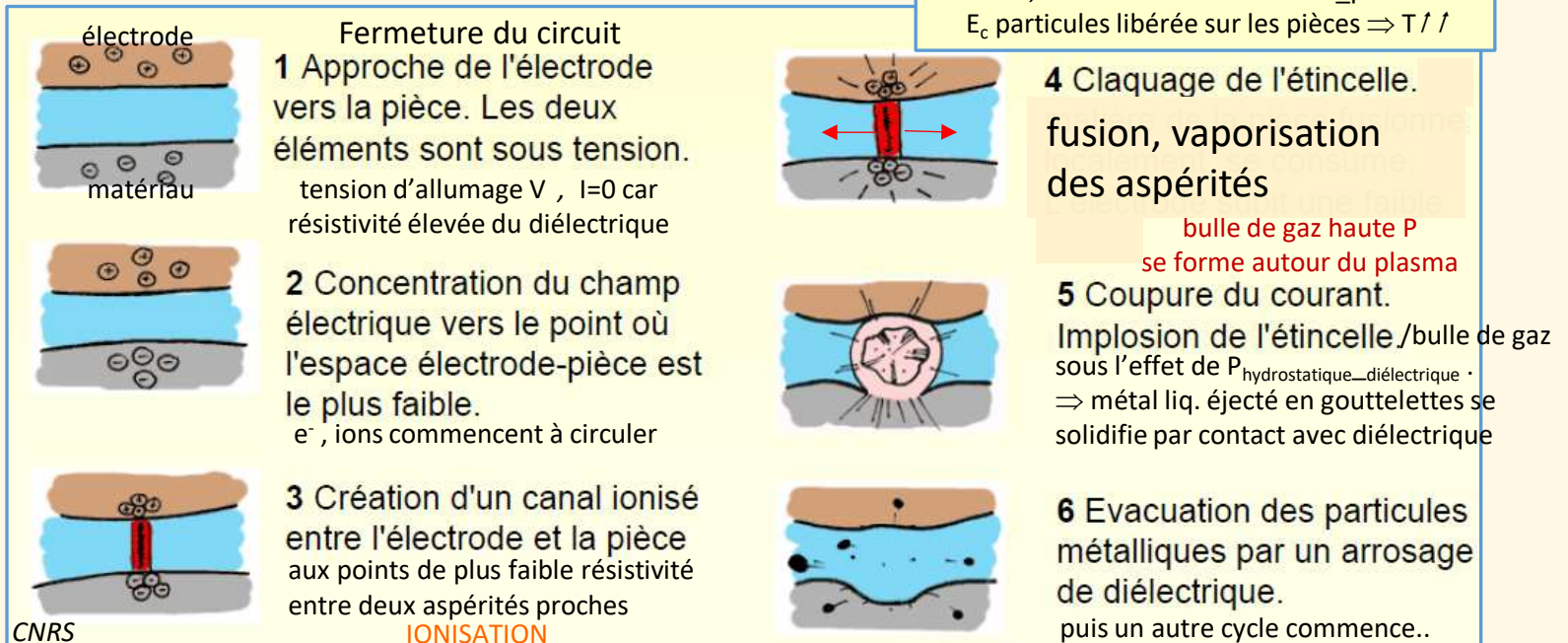
Procédés de découpe haute énergie

PRINCIPE :

- ♦ enlèvement de matière grâce à l'En. apportée par des décharges électriques
T dégagée par étincelles : 3000 - 12000 °C
→ fusion de matière / succession de cratères
portée de l'étincelle : qqes. μm à 1 mm
- ♦ **fluide diélectrique :**
huile, eau pure ou désionisée
permet la formation de l'étincelle
réduit T ds. zone d'usinage
évacue particules résiduelles



PROCESSUS de DECOUPE :

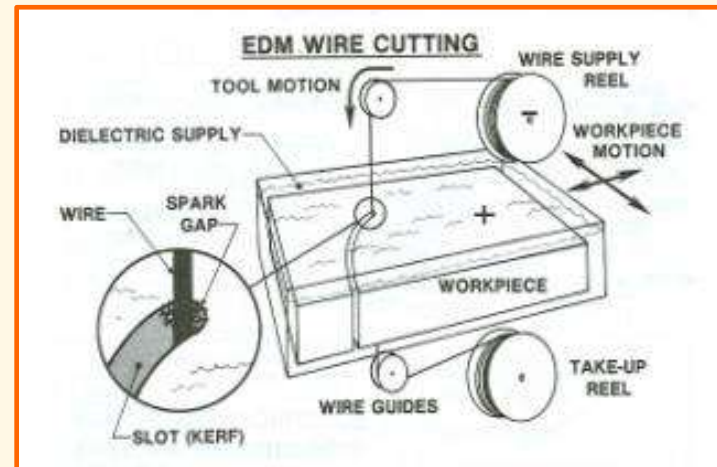
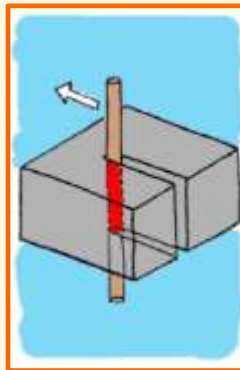


FONCTIONNEMENT :

- ♦ distance électrode-matériau maintenue cte.
 - ➔ enlèvement de matière homogène
- ♦ durée du cycle (qqes. μ s. – qqes. ms.)

LA DÉCOUPE PAR FIL (électrode) :

- fil tendu constamment déroulé d'une bobine magasin vers une bobine réceptrice (*éviter usure*)
- soumis à des sollicitations électriques haute fréquence ds. bain diélectrique
- faible \varnothing du fil : 0,02 à 0,3 mm



- grande précision d'usinage ($< 0,01$ mm), découpe de formes complexes
- vitesse de découpe : $1 \text{ mm}^3/\text{min}$ (*finition*) à $1 \text{ cm}^3/\text{min}$ (*ébauche*)
- très faibles rugosités ($R_a \sim 0,1 - 0,8 \mu\text{m}$)
- réalisation d'éprouvettes pour essais mécaniques *in situ*



R. Chiron-CNRS-LPMTM

- matériaux de conductivité électrique suffisante ($> 1 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$)

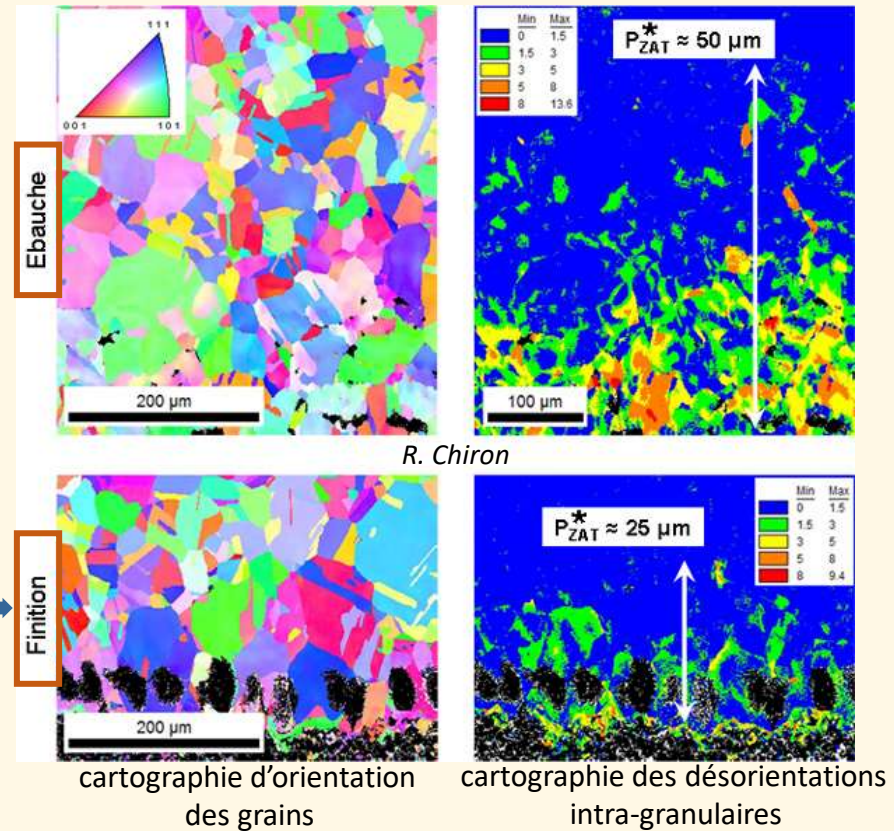
(alliages métalliques, graphites, céramiques conductrices ou semi-conductrices, certains matériaux composites (à base de SiC, de carbures,..), certains matériaux semi-conducteurs ou supraconducteurs, diamant polycristallin..)

CARACTÉRISATION de la ZONE AFFECTÉE par ÉLECTROÉROSION :

◆ Exemple d'un échantillon de nickel :

Préparation en vue de l'EBSD :
papier SiC jusqu'à granulométrie 4000 (5 µm)
+ polissage électrolytique

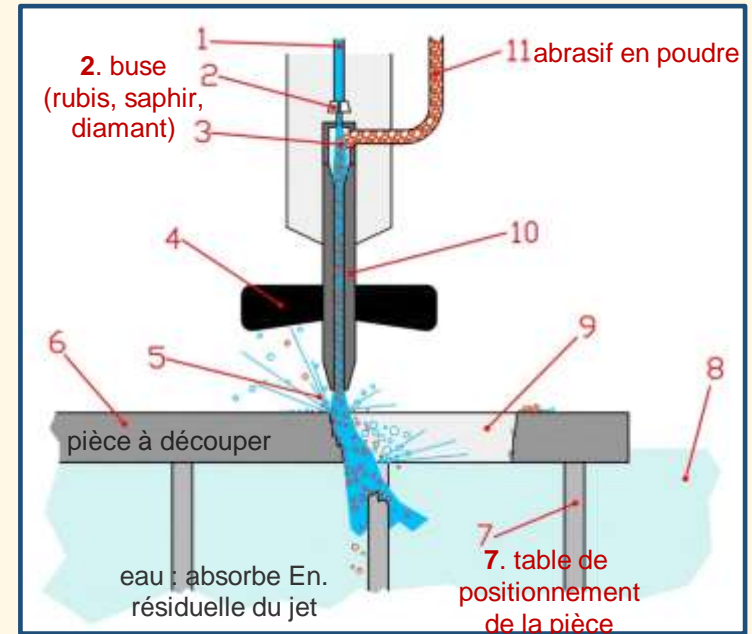
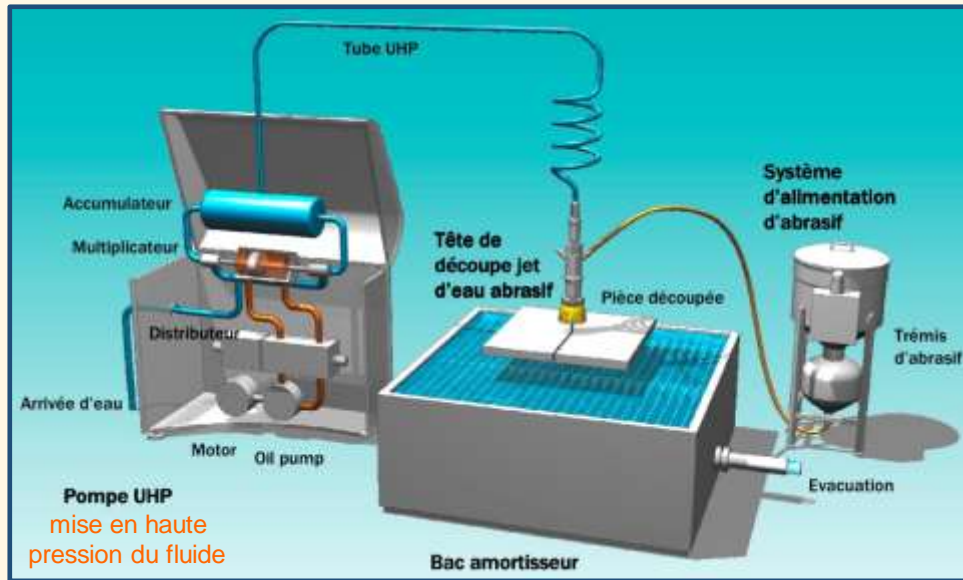
minimisation des effets thermiques
sur le matériau grâce au flux du
diélectrique liquide (eau)



angle α surface d'analyse/surface de découpe = 5°

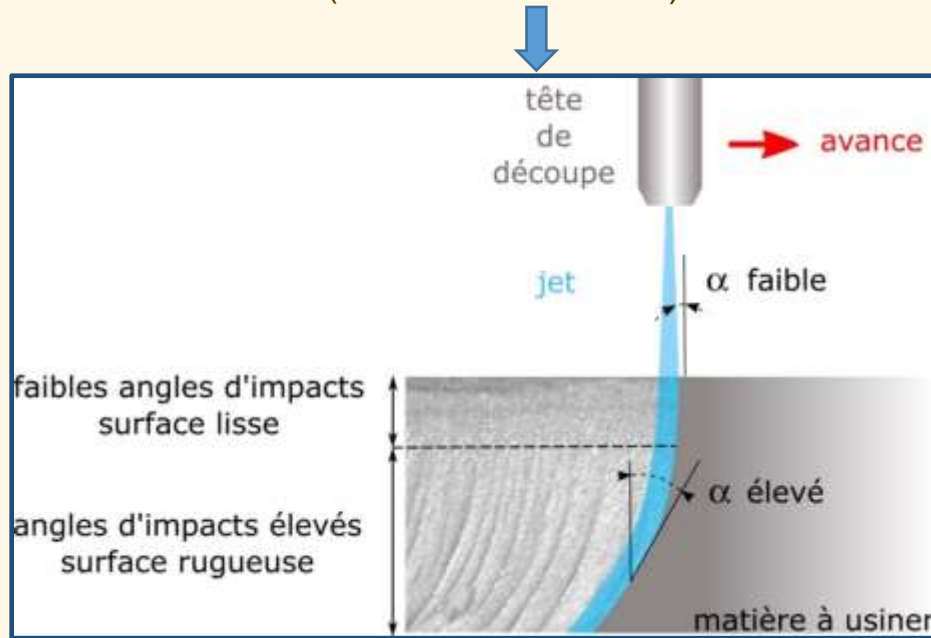
PRINCIPE :

- ♦ projection d'un fin jet d'eau à très grande vitesse ($P \rightarrow 6000$ bars, $\varnothing_{\text{orifice}} : 0,05$ à $0,3$ mm, $v_{\text{eau}} : 500$ à 1100 m/s.)
- ♦ découpe par transfert d' E_c du fluide (+ abrasifs pour mat. \oplus durs, $\varnothing_{\text{orifice}} : 1$ mm)
- ♦ découpe par arrachement de matière



CARACTERISTIQUES :

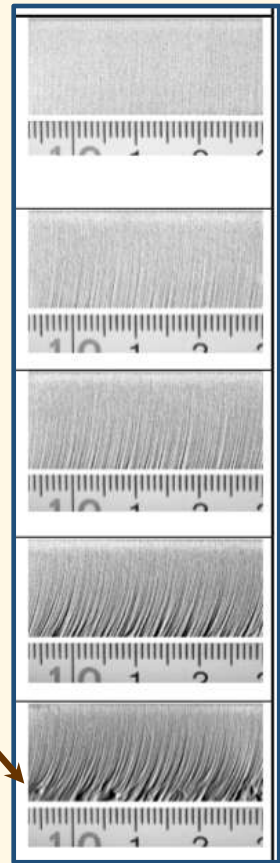
- ◆ Perte d'En. du jet d'eau dans l'épaisseur découpée
(f avec vit. d'avance)



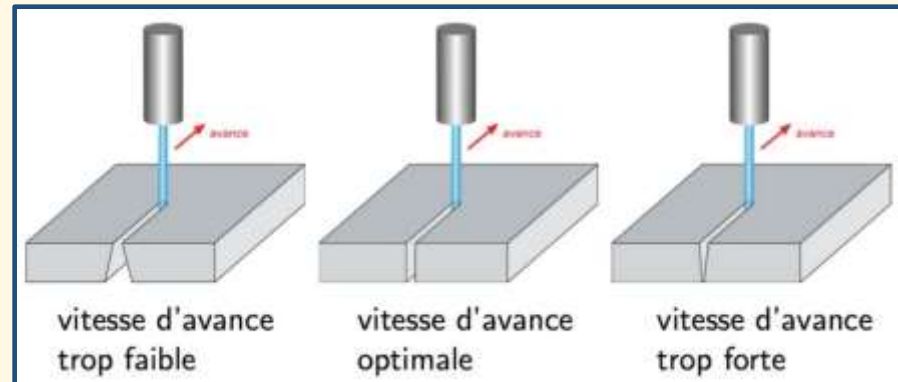
Dégradation de la surface découpée

Al
ép. : 15 mm

Vit. d'avance max :
zone de déformation
en fond de saignée
fortes irrégularités
(gorges grossières,
ébréchures, fragments
de coupe)



vit
d'avance
 f



Effet de la vitesse d'avance sur la dépouille

CARACTERISTIQUES :

- ♦ absence d'endommagement thermique
- ♦ zone affectée par l'abrasion et la déformation induite limitée
- ♦ possibilité de découpe de matériaux épais (> 100 mm ; 200 mm max)
- ♦ rugosité : R_a min. = 2,5 μ m
- ♦ Découpe d'une grande variété de matériaux :

- **Jet d'eau pure + polymère soluble**
(/ cohérence du jet)

- **Matériaux tendres :**

- textiles, papier, cuir, bois..
- plastiques, caoutchouc,..
- produits alimentaires

- **Jet d'eau + abrasifs**

- **Matériaux durs :**

- céramiques, verres..
- roches, béton
- métaux, alliages
- plastiques durs



- ♦ bruit (80 – 100 dB)
- ♦ précision de découpe (0,1 à 0,3 mm)
peut être optimisée à 0,02 mm
- ♦ difficulté de découper des corps creux



tête de coupe immergée \Rightarrow < 75 dB

CARACTERISTIQUES :

- ♦ Vitesse de découpe :

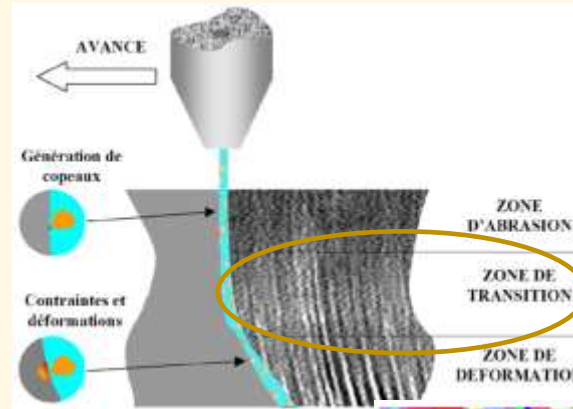
Exemples de vitesses de découpe en mm/min

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.

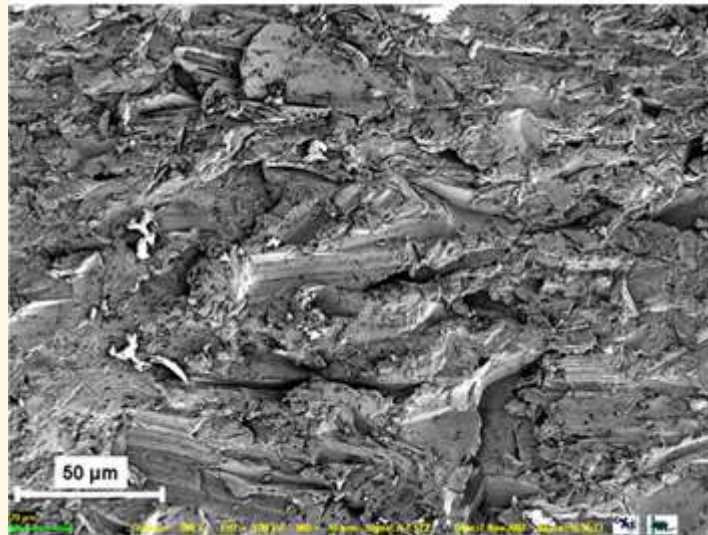
DÉCOUPE d'une PLAQUE DE NICKEL de 3 mm d'ÉPAISSEUR

- P : 3800 bars
- \varnothing canon : 0,8 mm
- abrasif : grenat
- vit. d'avance : 50 mm/min



angle α surface d'analyse/
surface de découpe = 5°

Préparation en vue de l'EBSD :
papier SiC \rightarrow granulométrie 4000 ($5 \mu\text{m}$)
+ polissage électrolytique

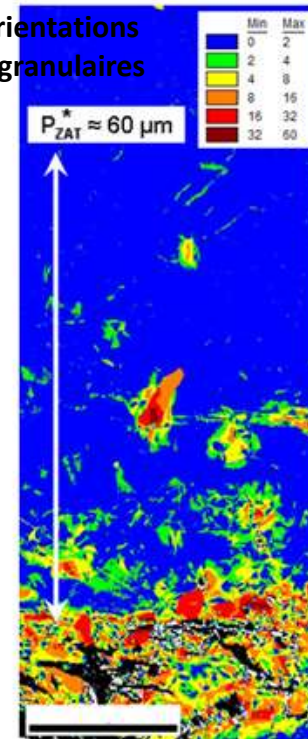


- arêtes vives
(caract. mat. mou abrasé par mat. dur)
- effet de labourage marqué



IPF

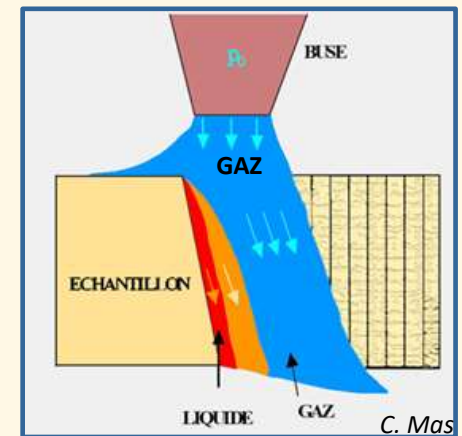
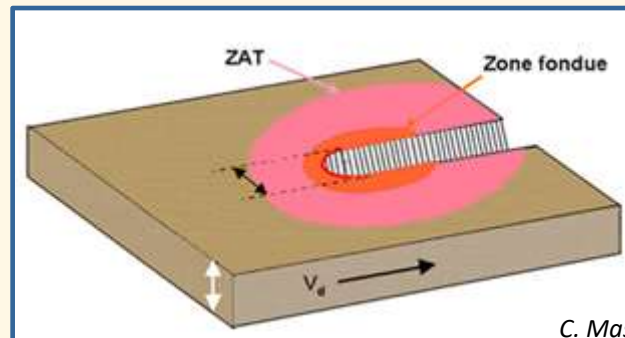
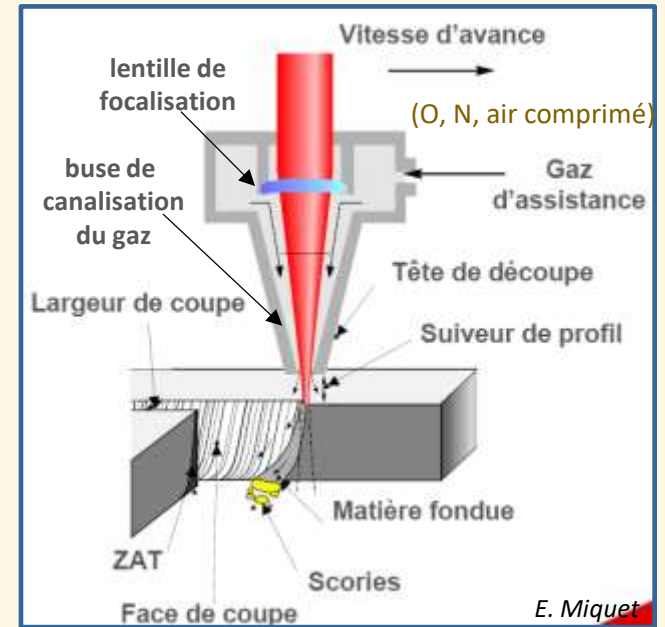
désorientations
intra-granulaires



matériau perturbé sur ép. max. $\sim 50\text{-}60 \mu\text{m}$
sur $\sim 30 \mu\text{m}$: fortes désorientations cristallo.
intra-granulaires dues aux forts impacts de grains abrasifs

PRINCIPE du PROCÉDÉ CONVENTIONNEL :

- ◆ faisceau laser focalisé dans l'épaisseur de la pièce
 - échauffement et fusion localisée de la matière
 - découpe possible si $P_{\text{sur pièce}} > 10^5 \text{ W/cm}^2$
- ◆ assistance par un gaz neutre sous P
 - évacuation des produits de fusion
 - limite l'oxydation de la découpe (gaz azote)
 - limite les dimensions de la ZAT
- ◆ déplacement contrôlé de la pièce ou de la tête du laser



écoulement du métal fondu sous l'action du gaz d'assistance

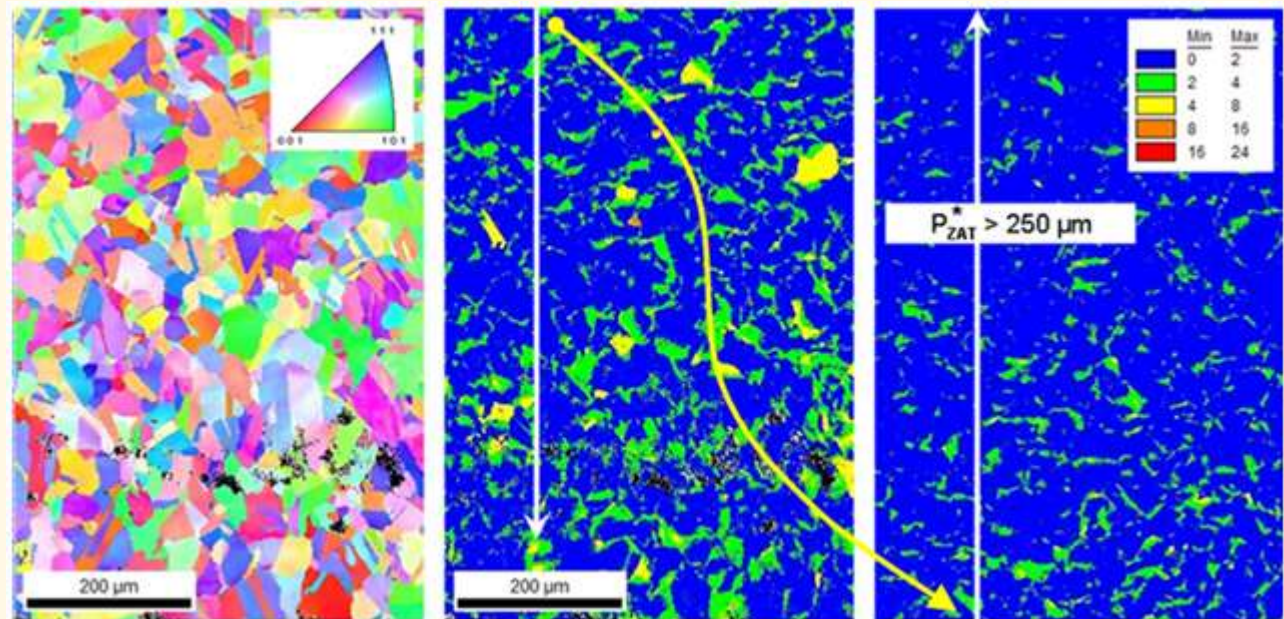
CARACTÉRISATION de la ZONE AFFECTÉE par la DECOUPE LASER CO₂ :

◆ Exemple d'un échantillon de nickel :

Préparation en vue de l'EBSD :
papier SiC jusqu'à granulométrie 4000 (5 µm)
+ polissage électrolytique

Marque	Puissance	Gaz de coupe	Vitesse (maxi)	lentille	Epaisseur maximale découpée		
TRUMPF	5000 W	N ₂ , 20 bars, buse Ø 1,7 mm	5 m/mn	127 mm (5 pouces)	Alliages Al 12 mm	Acier 25 mm	Inox 20 mm

caractéristiques du laser de découpe



perturbations sur
une profondeur élevée

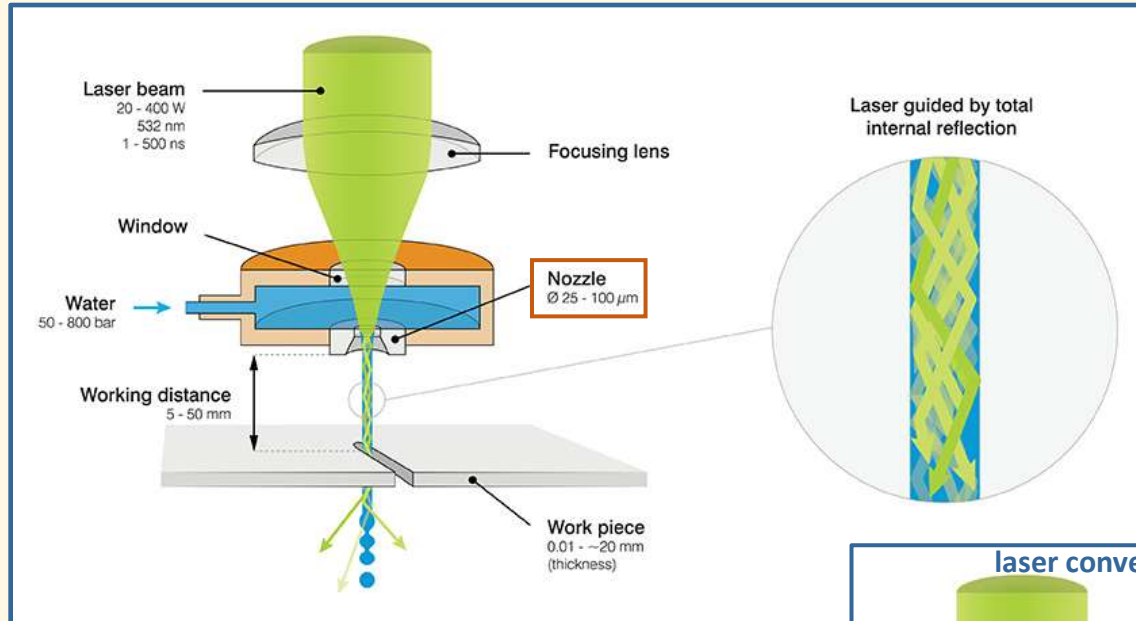
cartographie d'orientation des grains

cartographie des désorientations intra-granulaires

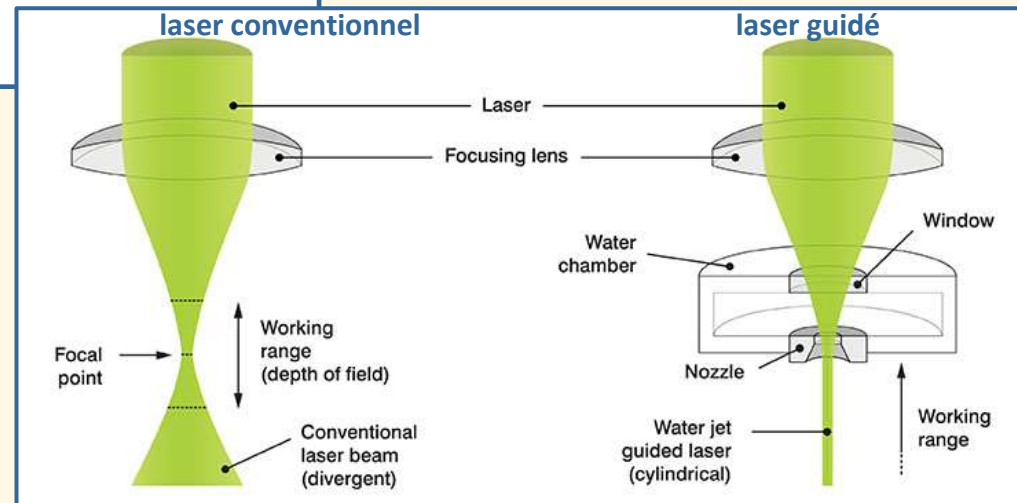
angle α surface d'analyse/surface de découpe = 10°

PRINCIPE :

- ♦ faisceau laser pulsé traverse une chambre d'eau pressurisée
- ♦ focalisé au niveau de la buse : sortie du fin jet d'eau basse P
- ♦ réflexion totale du faisceau à l'interface eau-air
- ♦ faisceau guidé sur une distance \rightarrow 10 cm
- ♦ jet d'eau refroidit, élimine résidus de coupe : entre les impulsions

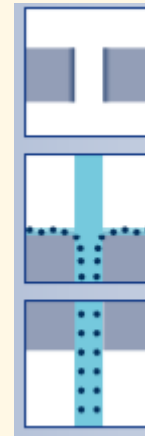
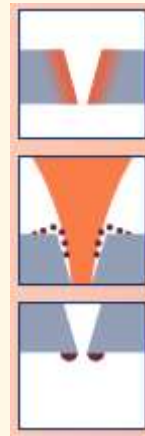


divergence du faisceau
 \rightarrow limite la distance de travail



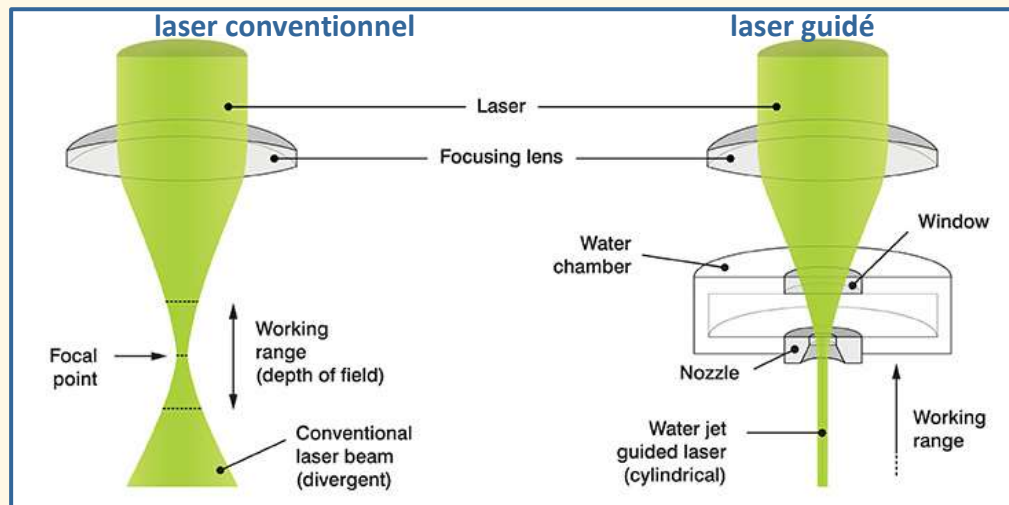
CARACTÉRISTIQUES :

La découpe par procédé laser Nd-YAG guidé par jet d'eau



- découpe // à haut facteur de forme (hauteur / largeur de rainure)
- faible largeur de trait de coupe
- peu de perte de matière
- découpe profonde
- - de dommages thermiques
- qualité de surface découpée

- jet d'eau :
- évacue résidus de coupe
- chasse matière fondue bavures



APPLICATIONS :

Domaines :

- SC, électronique
- horlogerie
- médical
- diamant
- micro-applications



Hard Tooling :
Super hard material such as cubic boron nitride (CBN), polycrystalline diamond (PCD), silicon nitride (SiN).



Watch Making :
Watch hands, precision metal parts



Medical :
Stents, needles, implants, scalpels

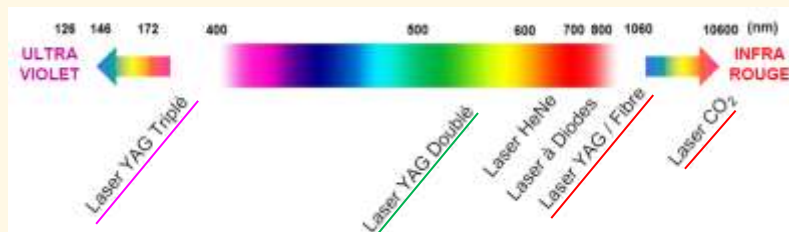


Diamond Industrie :
Cutting of raw diamonds



CARACTERISTIQUES :

	lasers continus à gaz CO ₂	lasers solides pulsés ou continus Nd-YAG	lasers Nd-YAG pulsés guidé par jet d'eau basse pression MicroJet®
longueur d'onde λ	10,6 μm	1,064 μm , 0,532 ou 0,355 μm	1,064 μm , 0,532 ou 0,355 μm
puissance	→ 20 kW	→ 5 kW (continus) 2 kW (pulsés)	→ 0,4 kW
plage de travail / épaisseur découpée	25 mm ds. acier	3 - 4 mm (continus) moindre (pulsés)	20 mm ds. Si 15 mm ds. superalliages
vitesse de coupe			→ 300 mm/s : Si ép. 50 μm , → 30.000 trous / h : acier inox ép.50 μm (\varnothing trou 80 μm)
précision de coupe	+/- 100 μm	+/- 20 μm (pulsés)	→ +/- 1.5 μm
rugosité			Ra < 0,5 μm
	les \oplus utilisés		



caractéristiques de découpe
(vit., ép. Max) dépendent de
l'absorption de l'onde laser par le
matériau (nature matériau, λ)

DECOUPE	Technique	profondeur endommagée par la découpe		précision	vitesse	
		Ni polycristallin recristallisé	acier			
GROSSIERE	scie à ruban	90 µm		⊗	très élevée	
FINE	scie CBN	30 µm	30 µm	0,03 mm	faible	
	fil diamanté	20 µm	faibles perturbations	?	très faible	
HAUTE ENERGIE	électro-érosion	50 µm – ébauche 30 µm – finition	30 µm – 100C6	< 0,01 mm	faible	
	jet d'eau	50 – 60 µm		0,05 mm	moyenne	
	laser CO ₂	> 250 µm	fortes perturbations	300 µm inox	> 0,1 mm	élevée
	laser Nd YAG guidé jet d'eau			< 0,01 mm	moyenne	

données issues des analyses EBSD - R. Chiron -

Techniques peu invasives à considérer : découpe :

- au jet d'eau
- par faisceau laser Nd-YAG guidé par jet d'eau (à tester)

Remerciements :

- Damien Crozet - Buehler
- Guillaume Jaillette - Presi

Merci de votre attention..