

 SYNOVA Ch. Dent-d'Oche CH-1024 Ecublens Suisse www.synova.ch	<h1>RAPPORT D'APPLICATION</h1>	Rapport No: 1411-5 Échantillon No: 2.2.1527
		CONFIDENTIEL

RAPPORT: Découpe de céramiques noires et blanches par Laser-MicroJet®

Pour Anonymous
Par Julien Le Clec'h, Synova SA

1. OBJECTIFS

La technologie du Laser-MicroJet® est utilisée pour découper 4 ponts sur le diamètre intérieur de deux types de carrures en zircone (ZrO₂) noire et blanche.

L'objectif principal est le temps de découpe, qui doit être minimisé au maximum, sachant que le point de comparaison pour ce même procédé avec un laser "sec" est de 1 second par pont. Notons toutefois que le model de carrures utilisé pour les présents tests sont de dimensions plus importantes que le model de carrures utilisé pour les tests au laser "sec".

D'autre part, la qualité et la précision de la découpe sont aussi des éléments importants. En effet, le matériau ne doit pas être agressé thermiquement afin d'éviter la création de fissures. De plus la possibilité de couper au plus proche des cotes finales permet de s'affranchir (ou de réduire le temps) des étapes de fraisage suivante. Ces étapes sont coûteuses en outillage et en temps (5 à 6 fraises diamantées pour 100 pièces).

Par ailleurs, durant la visite d'autres points d'intérêt ont été soulevés et testés, comme par exemple la découpe d'ébauches au plus près de la forme finale.

Ainsi la découpe d'un cercle de diamètre 36 mm sur une épaisseur de zircone noire de 7 mm a été testée avec succès.

Revue de rapport			
Ingénieur d'Application		Responsable Application	
Nom:	Julien Le Clec'h	Nom:	Dr. Benjamin Carron
Date:	27.11.2014	Date:	28.11.2014
Visa:	JLC	Visa:	BC



SYNOVA

Ch. Dent-d'Oche
CH-1024 Ecublens
Suisse
www.synova.ch

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1411-5

Échantillon No: 2.2.1527

CONFIDENTIEL

2. DESCRIPTION DES ÉCHANTILLONS

Le tableau ci-dessous résume les différents échantillons reçus.

ECHANTILLONS	Composants	Matière	Quantité
	Céramique blanche	ZrO ₂	8
	Céramique noire	ZrO ₂	8

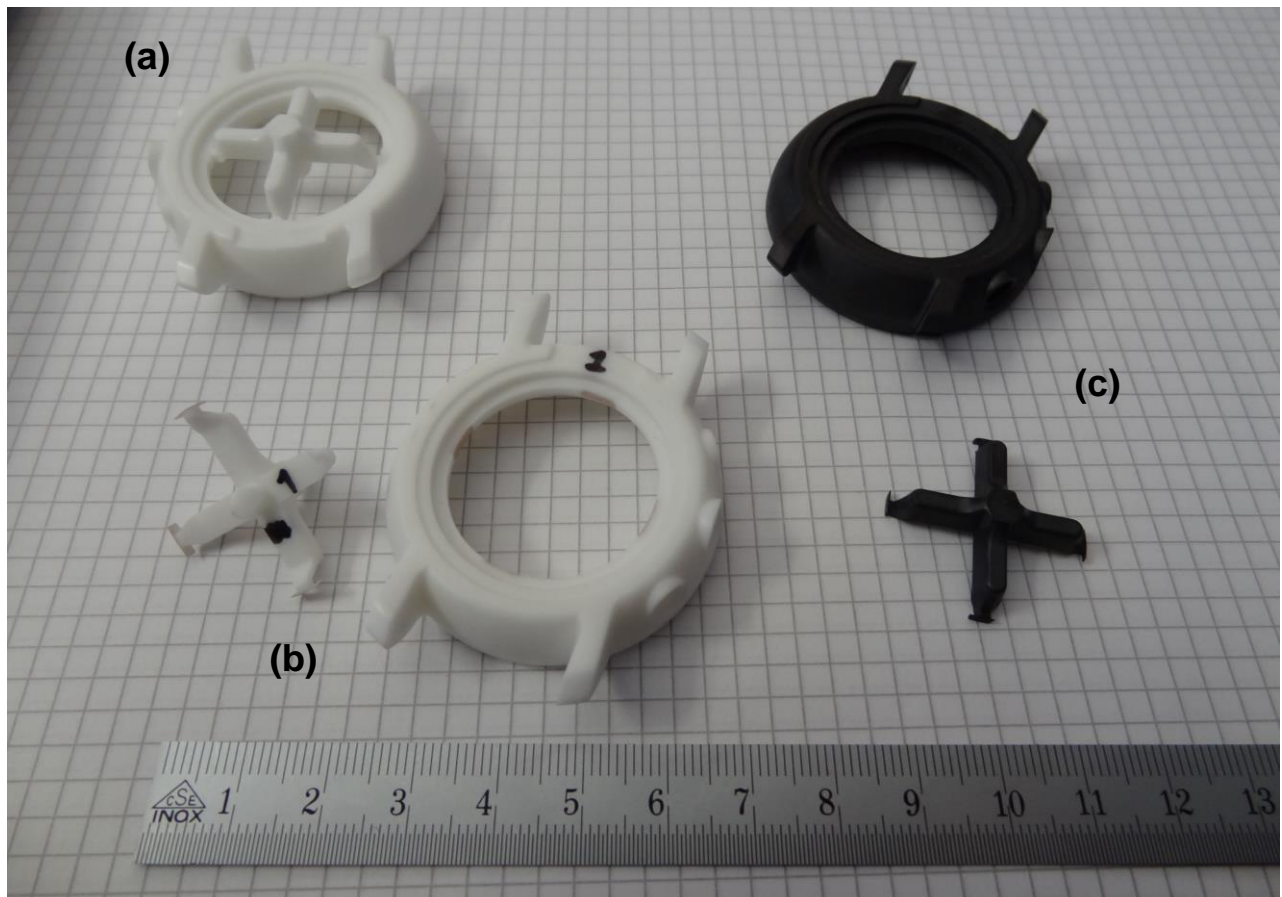


IMAGE 1 : Échantillons de zircone blanche avant (a) et après (b) découpe des ponts, et échantillon de zircone noire après découpe des ponts (c)

**SYNOVA**Ch. Dent-d'Oche
CH-1024 Ecublens
Suisse
www.synova.ch

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1411-5




Échantillon No: 2.2.1527

CONFIDENTIEL

3. PROCÉDÉ : INSTRUMENT & PARAMÈTRES DE DÉCOUPE

La LCS150, équipée d'un laser pulsé simple cavité utilisant la seconde harmonique du Nd:YAG, a été utilisée pour la découpe des pièces.

Le tableau ci-dessous regroupe l'ensemble des paramètres optimisés et utilisés pour l'intégralité des tests de découpe. Ceux-ci ont été gardés constants lors du développement.

	SYSTÈME	Type de machine	LCS150
		Débit d'hélium	0.9 <i>L/min</i>
		Distance de travail	15 <i>mm</i>
		Diamètre de fibre	150 μm
		Lentille de collimation	200 <i>mm</i>
		Température du SHG	28.5 $^{\circ}C$
		Puissance interne	52.5 <i>W</i>
		Transmission	65 %
	PARAMÈTRES DE LARGEUR DE COUPE	Diamètre de buse	80 et 60 μm
		Diamètre du MicroJet®	65 et 50 μm
		Pression d'eau	300 <i>bar</i>
		Gaz d'assistance	He
	PARAMÈTRES LASER	Type de laser	L101G
		Longueur d'onde	532 <i>nm</i>

En fonction des objectifs cités au début de ce document, le développement s'est axé principalement sur la vitesse de la découpe.

Pour la réalisation de ces tests nous avons utilisé la stratégie « multi-passe ». Celle-ci consiste à découper une pièce en passant à plusieurs reprises sur le même contour, coupant ainsi de plus en plus profond dans la matière jusqu'à la découpe complète.

4. RÉSULTATS

Nous abordons ici les résultats séparément pour chaque type de pièce :

	Matière	Quantité produite
Pièce A	Céramique blanche	5
Pièce B	Céramique noire	8

Les essais sur les pièces blanches et noires ont été menés en parallèle, afin de faire profiter au second matériau des améliorations observées sur le premier matériau.

Dans la suite de ce document les résultats sur la zircone blanche et sur la zircone noire sont présentés dans deux sections distinctes.

A. PIÈCES A

Les 5 pièces en zircone blanche ont été réalisées avec la stratégie de découpe en multi-passe.

Le tableau ci-dessous regroupe les différents paramètres testés :

- Les colonnes en texte noir sont des paramètres de réglage de la machine ;
- Les colonnes en texte gris sont des résultats de calculs en fonction des paramètres de réglage de la machine ;
- Les colonnes en texte jaune sont des résultats des découpes en fonction des paramètres de réglage de la machine ;
- Les cellules oranges sont les paramètres variant d'un essai à l'autre, les essais ayant été fait dans l'ordre croissant ;
- Lorsqu'un autre paramètre que la fréquence ou la vitesse de découpe a été changé, ces deux derniers paramètres ont été réglés à 10 kHz et 20 mm/s respectivement.

Sample name	Nozzle size [μm]	Water jet size [μm]	Freq [kHz]	Speed [mm/s]	Number of passes	Time per bridge [sec]	Overlap %	Phead [W]	T	Pjet [W]	Pulse energy [mJ]	Fluence [J/cm ²]	Pulse width [ns]	Pulse Int [W/cm ²]	Overall speed [mm/s]
White 1	80	66.4	10	20	not cut		96.99	52.5	0.65	34.1	3.41	98.55	190	5.19E+08	#VALUE!
White 1	80	66.4	6	20	200	60	94.98	50.5	0.65	32.8	5.47	157.99	190	8.32E+08	0.10
White 2	60	49.8	10	20	100	30	95.98	52.5	0.65	34.1	3.41	175.20	190	9.22E+08	0.20
White 3	60	49.8	10	10	not enough passes set to finish		97.99	52.5	0.65	34.1	3.41	175.20	190	9.22E+08	#VALUE!
White 4	60	49.8	6	20	150	45	93.31	50.5	0.65	32.8	5.47	280.87	190	1.48E+09	0.13
White 5	60	49.8	18	27	not cut		96.99	50.5	0.65	32.8	1.82	93.62	190	4.93E+08	#VALUE!

Les premiers essais ont été faits à une fréquence de 10 kHz, une des plus utilisées pour l'industrie horlogère grâce aux bons résultats qui en découlent. La puissance de 52.5 W interne et la largeur de pulse de 190 ns sont les valeurs les plus élevées possibles avec le laser utilisé. Une buse de 80 μm a été utilisée, car pour des fortes puissances et des temps de procédé rapides, un gros diamètre de buse est préconisé.

Le premier essai montre qu'une fluence de 100 J/cm², soit une intensité de pulse de 520 MW/cm² n'est pas suffisant pour amorcer la découpe de la céramique blanche. Ceci est dû au fait que la puissance du laser n'est pas absorbée par le matériau, du fait de sa couleur.

Ainsi sur la pièce 1, un second essai a été fait à une fréquence de 6 kHz, ce qui permet d'obtenir une fluence de 160 J/cm² et une intensité de pulse de 830 MW/cm². Il devient alors possible de couper la céramique blanche, avec un temps de 60 seconds par pont.

Ensuite pour l'essai 2, une buse de diamètre 60 μm a été utilisée, ce qui, à une fréquence de 10 kHz, permet aussi d'augmenter la fluence à 175 J/cm² et l'intensité du pulse à 920 MW/cm². Ainsi, le temps de coupe par pont est raccourci à 30 secondes.

Pour l'essai 3, une vitesse de 10 mm/s a été testée, car ainsi le recouvrement est augmenté de 96 à 98%. Bien que le recouvrement soit augmenté la zircone blanche ne se coupe pas à faible vitesse.

Revue de rapport	
Ingénieur d'Application	Responsable Application
Nom: Julien Le Clec'h	Nom: Dr. Benjamin Carron
Date: 27.11.2014	Date: 28.11.2014
Visa: JLC	Visa: BC

Pour l'essai 4, la fréquence a encore une fois été diminuée à 6 kHz afin d'augmenter la fluence et l'intensité de pulse (à 280 J/cm² et 1.5 GW/cm² respectivement). Bien que la céramique puisse être coupée dans ces conditions, cela ne permet pas d'améliorer le temps de procédé, qui est alors de 45 secondes.

Enfin pour le dernier essai, une fréquence de 18 kHz est testée, car sur la zircone noire cela donne des résultats optima (cf. section B pièce B). Cependant sur la zircone blanche cela ne va pas dans le même sens, car la découpe n'est pas possible à 18 kHz. En effet, dans ces conditions la fluence est inférieure à 95 J/cm² et l'intensité de pulse est inférieure à 500 MW/cm². Le matériau blanc absorbant moins l'énergie du laser que le matériau noir, on observe un seuil en fluence (respectivement en intensité de pulse) en dessous du quelle la découpe n'est pas possible. Ce seuil se situe entre 100 et 160 J/cm² (respectivement entre 520 et 830 W/cm²).

- ⇒ Avec le laser actuel installé sur cette machine, le temps de procédé minimum obtenu est de 30 secondes par pont.
- ⇒ On observe qu'il est nécessaire d'apporter une certaine quantité d'énergie pour amorcer la découpe de la zircone blanche (de faible absorption). La puissance interne délivrée par le laser utilisé pour les essais étant limitée à 50 W, la marge de manœuvre pour l'optimisation est donc très réduite.
- ⇒ Des essais avec un laser plus puissant, ou un laser double cavité pourrait permettre de diminuer les temps de procédés.

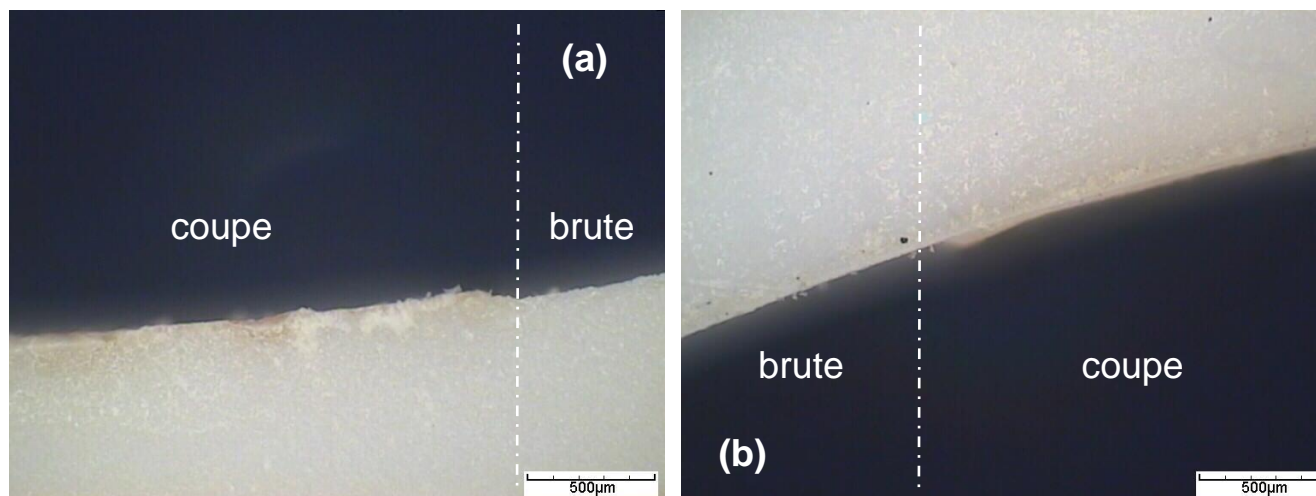


IMAGE 2 : Essai 2 - Photos de la face arrière de découpe (a) et de la face avant de découpe et montrant une très belle qualité de découpe.

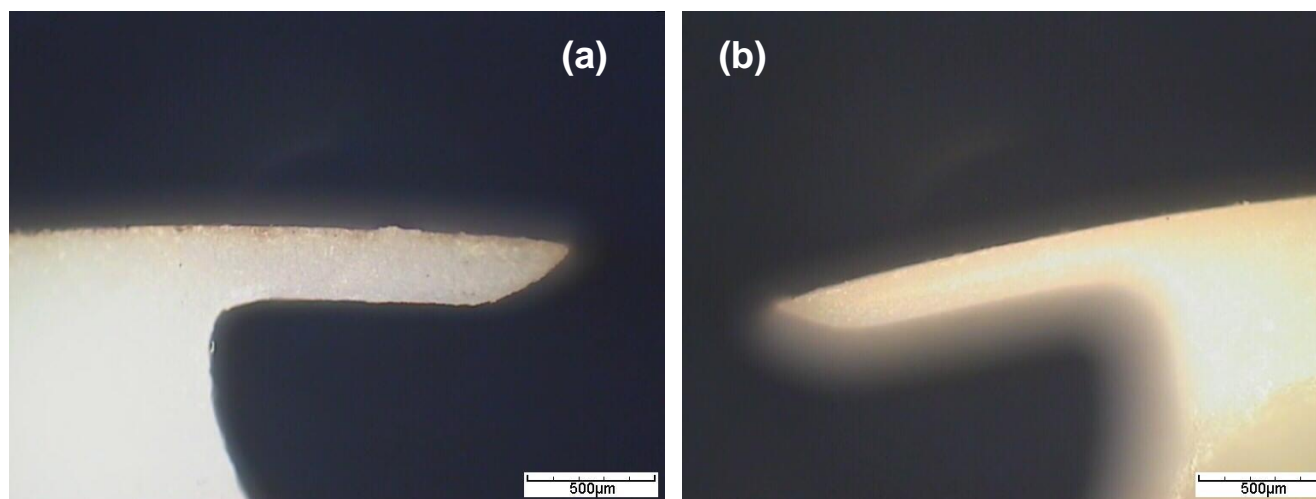


IMAGE 3 : Essai 2 - Photos de la face arrière de découpe (a) et de la face avant de découpe (b) sur les chutes, montrant une très belle qualité de découpe.

B. PIÈCES B

Les 8 pièces en zircone noire ont été réalisées avec la stratégie de découpe en multi-passe.

Le tableau ci-dessous regroupe les différents paramètres testés :

- Les colonnes en texte noir sont des paramètres de réglage de la machine ;
- Les colonnes en texte gris sont des résultats de calculs en fonction des paramètres de réglage de la machine ;
- Les colonnes en texte jaune sont des résultats des découpes en fonction des paramètres de réglage de la machine ;
- Les cellules oranges sont les paramètres variant d'un essai à l'autre, les essais ayant été fait dans l'ordre croissant (excepté pour les essais 7 et 8);
- Lorsqu'un autre paramètre que la fréquence ou la vitesse de découpe a été changé, ces deux derniers paramètres ont été réglés à 10 kHz et 20 mm/s respectivement.

Revue de rapport			
Ingénieur d'Application		Responsable Application	
Nom:	Julien Le Clec'h	Nom:	Dr. Benjamin Carron
Date:	27.11.2014	Date:	28.11.2014
Visa:	JLC	Visa:	BC

Sample name	Nozzle size [μm]	Water jet size [μm]	Freq [kHz]	Speed [mm/s]	Number of passes	Time per bridge [sec]	Overlap %	Phead [W]	T	Pjet [W]	Pulse energy [mJ]	Fluence [J/cm ²]	Pulse width [ns]	Pulse Int [W/cm ²]	Overall speed [mm/s]
Black 1 - Too large diameter	80	66.4	10	10	25	15	98.49	52.5	0.65	34.1	3.41	98.55	190	5.19E+08	0.40
Black 2 - Adjusted diameter	80	66.4	10	10	25	15	98.49	52.5	0.65	34.1	3.41	98.55	190	5.19E+08	0.40
Black 3 - Adjusted diameter	80	66.4	10	20	50	15	96.99	52.5	0.65	34.1	3.41	98.55	190	5.19E+08	0.40
Black 4 - Adjusted diameter	80	66.4	10	50	125	12	92.47	52.5	0.65	34.1	3.41	98.55	190	5.19E+08	0.40
Black 5 - Adjusted diameter	80	66.4	6	20	100	30	94.98	52.5	0.65	34.1	5.69	164.25	190	8.64E+08	0.20
Black 6 - Adjusted diameter	60	49.8	10	20	50	15	95.98	52.5	0.65	34.1	3.41	175.20	190	9.22E+08	0.40
Black 7 - Adjusted diameter	60	49.8	18	20	25	7	97.77	50.5	0.65	32.8	1.82	93.62	190	4.93E+08	0.80
Black 8 - Shortest width	60	49.8	10	20	100	10	95.98	52.5	0.65	34.1	3.41	175.20	190	9.22E+08	0.20

Les premiers essais ont été faits à une fréquence de 10 kHz, une des plus utilisées pour l'industrie horlogère grâce aux bons résultats qui en découlent. La puissance de 52.5 W interne et la largeur de pulse de 190 ns sont les valeurs les plus élevées possibles avec le laser utilisé. Une buse de 80 μm a été utilisée, car pour des fortes puissances et des temps de procédé rapides, un gros diamètre de buse est préconisé.

Le premier essai a révélé qu'en prenant un diamètre de 27.5 mm, tout en appliquant une compensation de la taille de l'outil, la découpe du pont mange une partie du cylindre intérieur. Pour les essais suivant un diamètre de 27.3 mm a été préféré.

Les tests 2, 3 et 4 montrent qu'à 10 kHz l'influence de la vitesse de découpe n'a pas ou peu d'influence sur les temps de découpe. Néanmoins une vitesse de 50 mm/s donne un recouvrement faible (<93%), ainsi une vitesse de 20 mm/s semble plus judicieuse.

L'essai 5 a été fait à une fréquence de 6 kHz, ce qui permet d'augmenter la fluence (de 99 à 165 J/cm²), ainsi que l'intensité de pulse (de 520 à 865 MW/cm²). Cette idée est venue de la céramique blanche, qui nécessite une fluence minimum pour initier la découpe (cf. section A Pièce A). Cependant, à 6 kHz, on observe un nombre de passe, donc un temps par pont, doublé par rapport au procédé à 10 kHz.

Revue de rapport	
Ingénieur d'Application	Responsable Application
Nom: Julien Le Clec'h	Nom: Dr. Benjamin Carron
Date: 27.11.2014	Date: 28.11.2014
Visa: JLC	Visa: BC

Pour les essais 6 et 7 une buse de 60µm a été utilisée, ce qui a fréquence constante permet d'augmenter la fluence (jusqu'à 175 J/cm² à 10 kHz – essais 6), donc l'intensité du pulse (jusqu'à 920 MW/cm² à 10 kHz – essai 6).

L'essai 6 à 10 kHz et 20 mm/s, montre que l'on obtient un nombre de passes et un temps de découpe similaire à l'optimum obtenu avec une buse de 80 µm (50 passes et 15 seconds respectivement).

Pour l'essai 7, la fréquence a été augmentée à 18 kHz, afin de refaire descendre la fluence aux alentours des 95 J/cm² et l'intensité aux alentours des 500 MW/cm², car nous avons vu avec l'essai 5 à 6 kHz qu'une forte fluence n'était pas nécessaire pour le matériau noire. Ce faisant, le nombre de passe nécessaire à couper un pont est réduit à 25, ce qui donne 7 secondes de découpe par pont.

Une vitesse de 20 mm/s a été utilisée pour l'essai 7, ce qui donne un recouvrement de 98%. En augmentant la vitesse à 27 mm/s le recouvrement sera alors de 97%, ce qui est équivalent au recouvrement de l'essai 3 (résultats optimum avec une buse 80 µm).

Enfin pour l'essai 8, la découpe a été faite sur une section plus étroite du pont, en gardant les paramètres de l'essai 6. Cela revient à simuler un design de moule sans épaulement. Le temps de découpe est ainsi diminué de 33%.

- ⇒ Par extrapolation, en coupant sur la section la plus fine, avec les paramètres optima (essais 7), un temps de procédé de 4.5 secondes par pont est atteignable.
- ⇒ Si l'on ajoute à cela l'optimisation possible sur le recouvrement (via la vitesse de découpe), on peut espérer atteindre une vitesse de découpe de 3 secondes par pont.

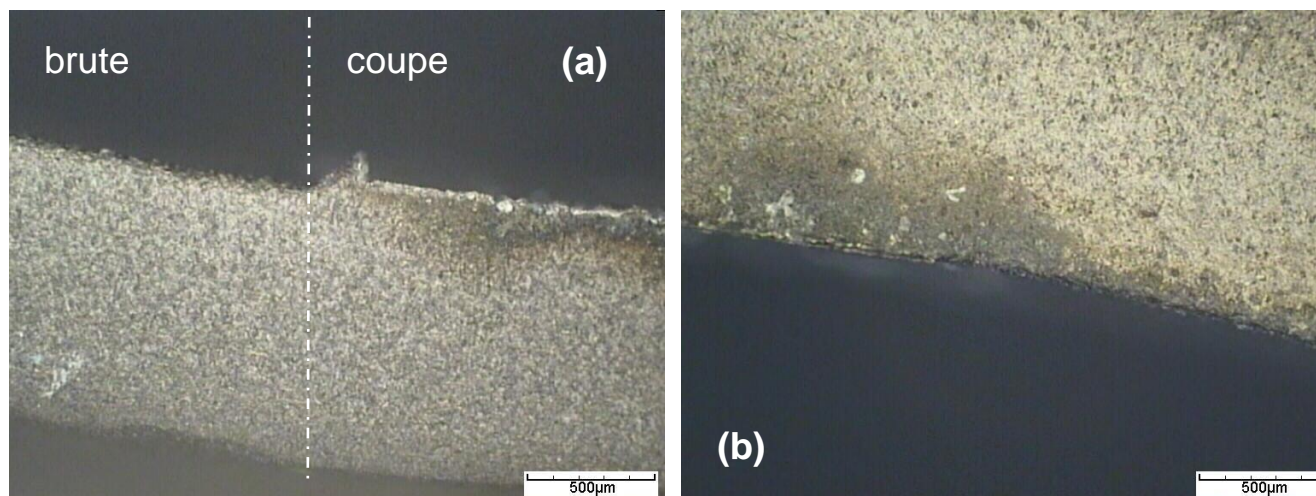


IMAGE 4 : Essai 7 - Photos de la face arrière de découpe (a) et de la face avant de découpe montrant une très belle qualité de découpe.

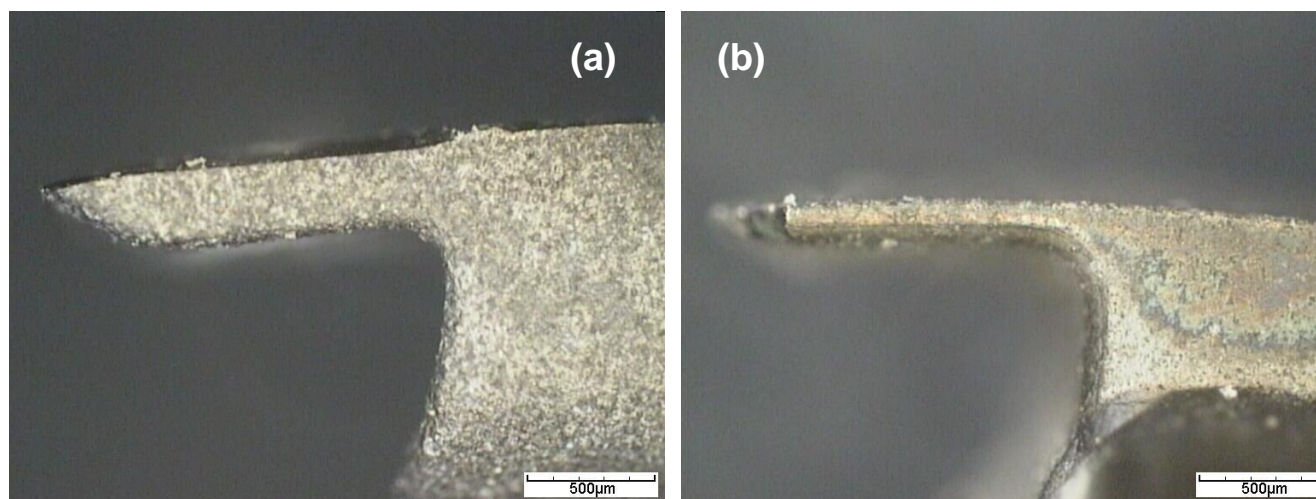


IMAGE 5 : Essai 7 - Photos de la face arrière de découpe (a) et de la face avant de découpe (b) sur les chutes, montrant une très belle qualité de découpe.

**SYNOVA**Ch. Dent-d'Oche
CH-1024 Ecublens
Suisse
www.synova.ch

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1411-5

Échantillon No: 2.2.1527

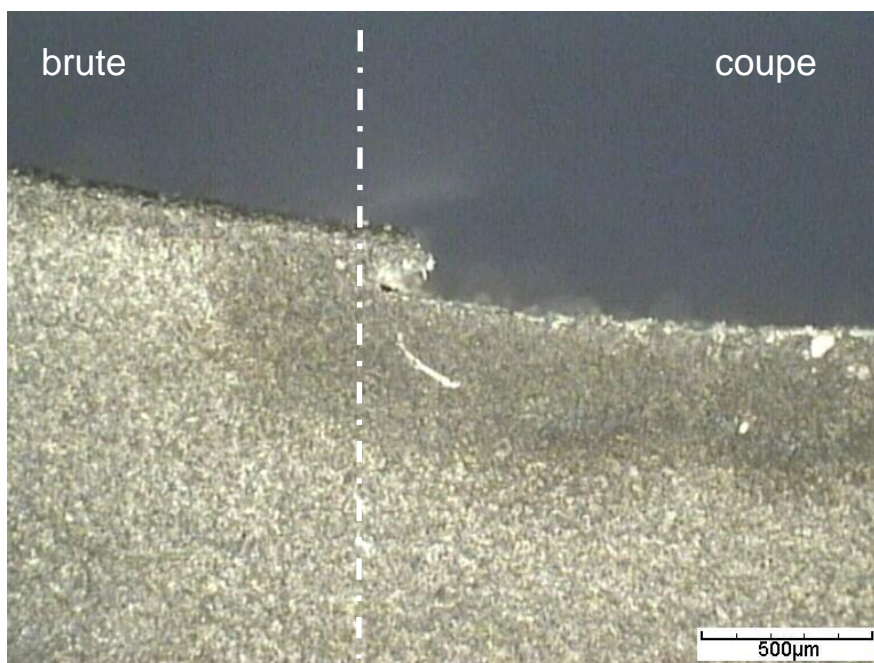
CONFIDENTIEL

IMAGE 6 : Essai 1 - Photos de la face arrière de découpe montrant la coupe trop large mangeant le cadran.

D'autre part, un essai de découpe sur une épaisseur de 7 mm a aussi été fait, le diamètre du cercle usiné étant de 36 mm. Pour ce faire, les paramètres de l'essai 6 ont été utilisés.

- ⇒ La découpe s'est bien déroulé, et il a fallu un total de 320 passes en 30 minutes pour découper ce cylindre de 7 mm par 36 mm ;
- ⇒ Le fait d'utiliser les paramètres de l'essai 7 pourrait permettre de gagner en temps de procédé ;
- ⇒ L'état de surface montre une faible rugosité sur la tanche du cylindre ;
- ⇒ On observe néanmoins quelques éclats en face arrière de découpe, ce qui peut être évité en optimisant les paramètres de découpe, et notamment en introduisant une passe de finition à puissance et vitesse plus faible à la fin de la découpe pour éviter de venir casser la matériau quand celui-ci devient fin ;
- ⇒ D'autre part, on peut observer une marque sur la tranche du cylindre. Elle est due au fait que, le porte échantillon utilisé n'étant pas adapté à ce type de pièce en particulier, la pièce n'était pas tenue de manière horizontale. Ainsi vers la fin de la découpe le cylindre intérieur a bougé, et un début de découpe a été amorcé sur la tanche du cylindre. Cela peut facilement être évité par l'élaboration d'un port échantillon adapté aux pièces.

Revue de rapport			
Ingénieur d'Application		Responsable Application	
Nom:	Julien Le Clec'h	Nom:	Dr. Benjamin Carron
Date:	27.11.2014	Date:	28.11.2014
Visa:	JLC	Visa:	BC

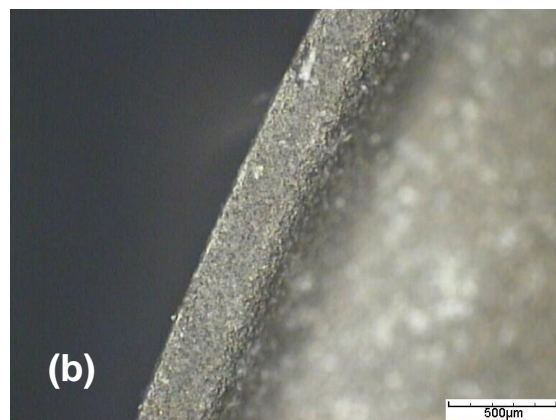
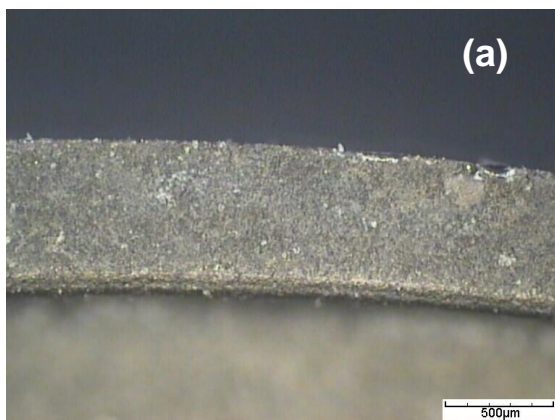


IMAGE 7 : Découpe 7 mm - Photos de la face arrière de découpe (a) et de la face avant de découpe (b) montrant une très belle qualité de découpe.

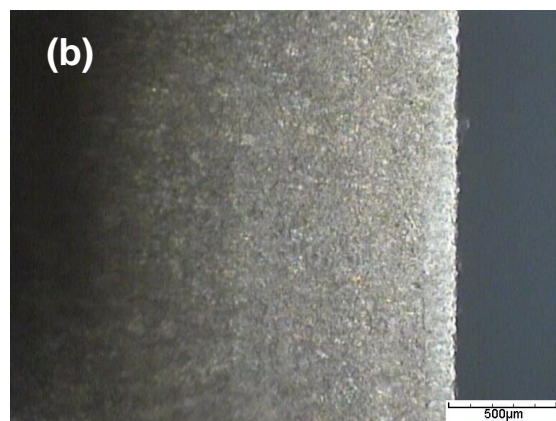
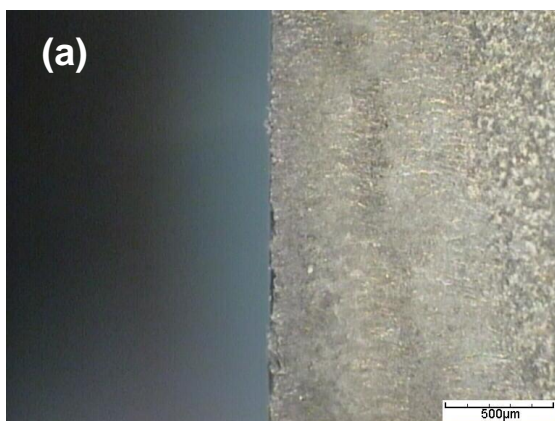


IMAGE 8 : Découpe 7 mm - Photo de la face arrière de découpe (a) et de la face avant de découpe (b) sur la tranche, montrant une très belle qualité de découpe.

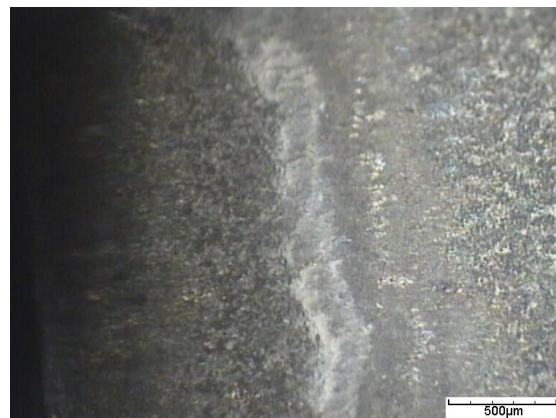
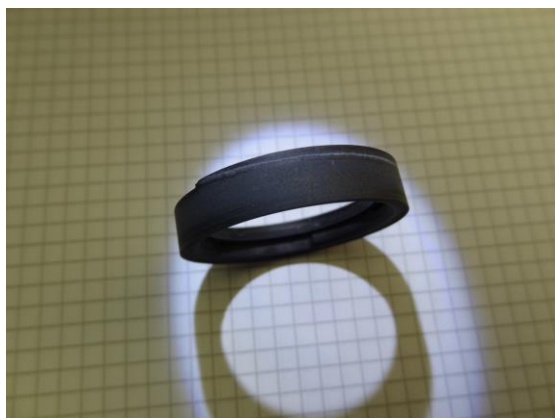


IMAGE 9 : Découpe 7 mm – Photos montrant la marque de coupe sur la tranche, due au porte échantillon non adapté, en vue globale (a) et en vue microscopique (b).

 <div>SYNOVA Ch. Dent-d'Oche CH-1024 Ecublens Suisse www.synova.ch</div>	<h1>RAPPORT D'APPLICATION</h1>	Rapport No: 1411-5 Échantillon No: 2.2.1527
		CONFIDENTIEL

5. CONCLUSION

Les découpes de pièces en zircone blanche et noire ont été réalisées sur une machine SYNOVA DCS150. Cette machine utilise la technologie du Laser MicroJet® et combine les avantages du laser pulsé à haute énergie avec les propriétés de guide d'ondes et de refroidissement apporté par un jet d'eau de ~50 µm de diamètre. Le laser est utilisé pour l'ablation du matériau. Le jet d'eau, pour sa part, guide le faisceau laser, refroidit le bord de découpe et évacue les particules sublimées.

Ces tests montrent :

- L'effet de seuil sur la zircone blanche ;
 - L'effet de la fréquence vis-à-vis de la fluence sur la zircone noir (augmenter la fréquence, est bénéfique, bien que cela diminue la fluence, tant que cette dernière reste au-dessus du seuil de découpe – qui est assez bas pour la zircone noire) ;
 - L'effet de la taille de la buse, qui doit être assez large pour pouvoir faire passer de la puissance, mais pas trop pour ne pas faire chuter la fluence ;
 - L'effet de la vitesse de découpe, qui influe sur le recouvrement et donc sur le temps de procédé, mais de façon non linéaire.
- ✓ La possibilité de réduire les temps de procédé à 7 secondes et 30 secondes pour la zircone noire et blanche respectivement, dans la configuration actuelle ;
 - ✓ La possibilité de réduire le temps de procédé à **3 secondes pour la zircone noire** en ajustant encore les paramètres ;
 - ✓ La possibilité d'**optimiser** encore les paramètres pour la **zircone blanche** en utilisant une **autre source laser** (autre source laser qui pourra aussi être utilisée pour encore améliorer la zircone noire) ;
 - ✓ La possibilité de couper de **grosses épaisseurs** avec une qualité parfaite ;

Nous vous remercions pour l'intérêt que vous portez en notre technologie et espérons que nos résultats sont en accord avec vos exigences.

Nous vous contacterons très prochainement afin d'obtenir un retour sur ces essais pour partager nos résultats d'analyses et ainsi discuter avec vous des prochaines étapes.