

RAPPORT: Découpe de platines et de staturs par Laser-MicroJet®

Pour Anonymous

Par Florent Bruckert, Sébastien Kurzen, Synova SA

PRÉAMBULE

Au cours de la première itération et avec un matériau identique à l'itération traitée dans ce document, nous avons effectué des tests de vitesses maximales avec une source laser émettant dans l'infrarouge et une source laser émettant dans le vert. La vitesse maximale obtenue dans l'infrarouge a été mesurée à 0.5 mm/s, tandis que celle mesurée avec le laser vert a été mesurée à 1 mm/s. Nous avons donc choisi de poursuivre les tests uniquement avec une source laser verte.

1. OBJECTIFS

La technologie du Laser-MicroJet® a été utilisée pour la découpe de plusieurs pièces horlogères dans des substrats de FeSi, FeNi et de vacoperm. La première tâche consistait à réaliser des platines en FeSi et en FeNi pour lesquelles, les objectifs à atteindre étaient :

- Une découpe de qualité optimale ;
- Une découpe à une vitesse maximale ;
- Réalisation d'une ouverture en un temps minimal ;
- Une optimisation qualité-vitesse en fonction de différents paramètres de découpe.

La deuxième tâche consistait en la découpe d'alvéoles dans des staturs fournis par le client. Les objectifs étaient :

- La réalisation d'une alvéole carrée 40x40 µm ;
- La réalisation d'une alvéole circulaire ;
- La découpe d'un statur entier, avec optimisation de qualité.

Revue de rapport			
Chef de projet		Responsable Application	
Nom:	F. Bruckert, S. Kurzen	Nom:	Dr. Benjamin Carron
Date:	04.12.2013	Date:	11.12.2013
Visa:	FBR, SK	Visa:	BC

2. DÉCOUPE DE PLATINE

Dans cette section, nous reprenons les questions et demandes formulées dans le cahier des charges intitulé « Projet NTC : Laser, découpe platine ferrom., essai 1 ».

2.1. DESCRIPTION




Le tableau ci-dessous résume les différents échantillons reçus.

ECHANTILLONS	Composants	Matière	Dimension [µm x µm]	Épaisseur [µm]	Quantité
	Platine ferrom.	FeSi	300x100	500	14
	Platine ferrom.	FeNi	300x100	600	6

2.2 PROCÉDÉ: INSTRUMENT & PARAMÈTRES DE DÉCOUPE

La LCS 300, équipée d'un laser pulsé utilisant la seconde harmonique du Nd:YAG a été déterminée comme la machine disponible dans notre laboratoire la mieux adaptée pour la découpe de vos pièces.

Dans le tableau ci-dessous, vous trouverez l'ensemble des paramètres optimisés et utilisés pour l'intégralité des tests de découpe. Ceux-ci ont été gardés constants lors du développement.

	SYSTÈME	Machine	LCS300
		Fixation	<i>Pincé</i>
	PARAMÈTRES DU MICROJET®	Diamètre de buse	60 µm
		Distance de travail	12 mm
		Pression d'eau	300 bar
		Gaz d'assistance	He
		Débit	0.9 L/min
	PARAMÈTRES LASER	Laser	L202G
		Longueur d'onde	532 nm

En fonction des objectifs cités au début de ce document, le développement s'est axé dans un premier temps sur la qualité de la découpe, puis sur le temps d'usinage de la pièce et finalement, sur l'optimisation de la qualité en un temps minimal.

Nous avons alors choisi d'utiliser un ensemble de paramètres laser optimisés pour la rugosité (P1 dans le tableau 1) et pour le taux d'ablation sur les métaux fins et épais (P2 dans le tableau 1).

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

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1312-4

Echantillon No: 2.2.1310

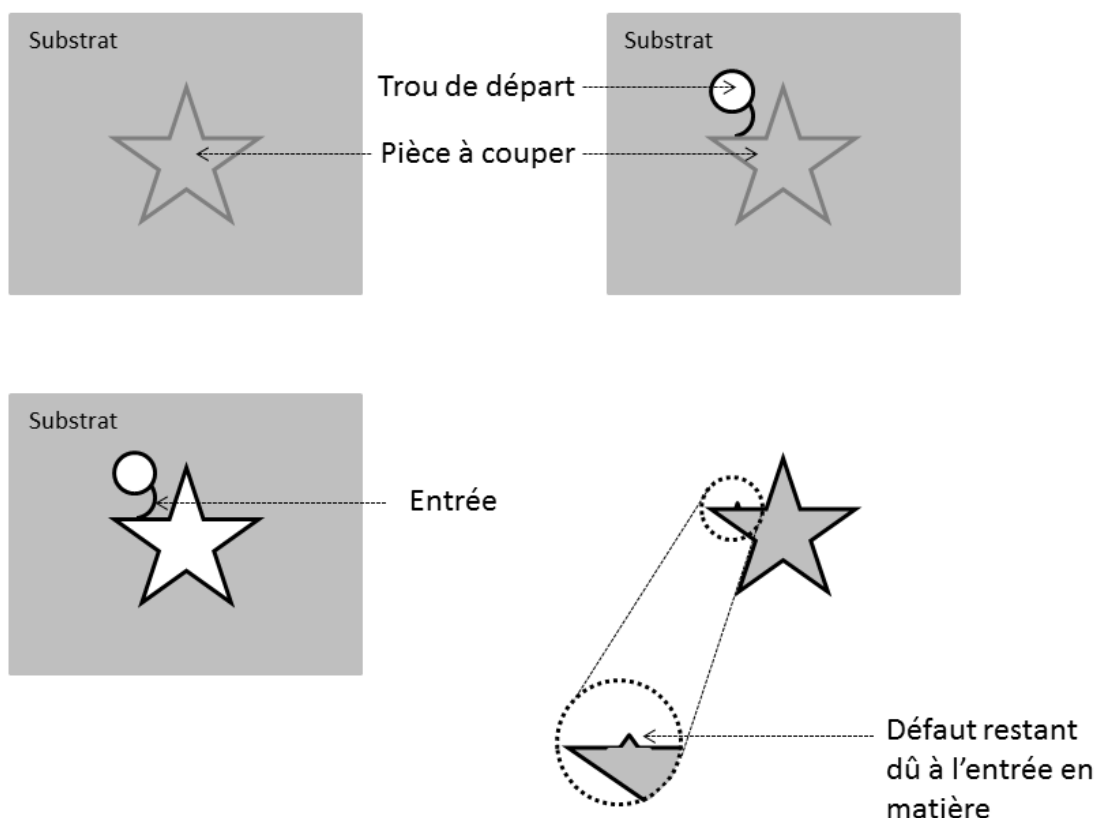
CONFIDENTIEL

PARAMETRES LASER	Paramètres	P1	P2
	Taux de répétitions [kHz]	10	20
	Temps de pulse [ns]	120	150
	Puissance laser interne [W]	42	104
	Puissance laser dans le jet [W]	25.2	62.4

TABLEAU 1 : Récapitulatif des paramètres laser utilisés.

Dans ce qui suit, nous faisons référence aux stratégies de multipasse et de monopasse. La première 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.

La seconde consiste à découper une pièce en un seul passage du laser. Cependant, pour garantir la qualité de coupe, le laser nécessite d'être déjà traversant au début du contour de la pièce. Pour ce faire, nous coupons en multipasse un « start hole », à proximité de la pièce à usiner. Le laser traversant passe alors de ce trou au contour de la pièce par ce qu'on appelle un « lead in », ou une « entrée dans la matière ». En principe, et comme montré dans l'image ci-dessous, cette stratégie laisse un petit appendice sur le contour de la pièce, à l'endroit du « lead in ».

**IMAGE 1** : Illustration découpe monopasse avec « lead in ».

Une passe de finition est, comme son nom l'indique, le passage du laser pour affiner la qualité de la découpe. Une technique utilisée à Synova est de découper le contour de la pièce de manière traversante, puis, de déplacer de quelques microns le faisceau laser en direction de la pièce et de

procéder à un dernier passage sur tout le contour. Ce dernier passage permet donc de lisser le profil de la pièce. L'image 2 ci-dessous illustre ce procédé.

Dans cette application, une stratégie en monopasse a été déterminée comme la plus satisfaisante en termes de qualité de coupe. Par ailleurs, une passe de finition a été appliquée sur chaque contour interne des différentes pièces.

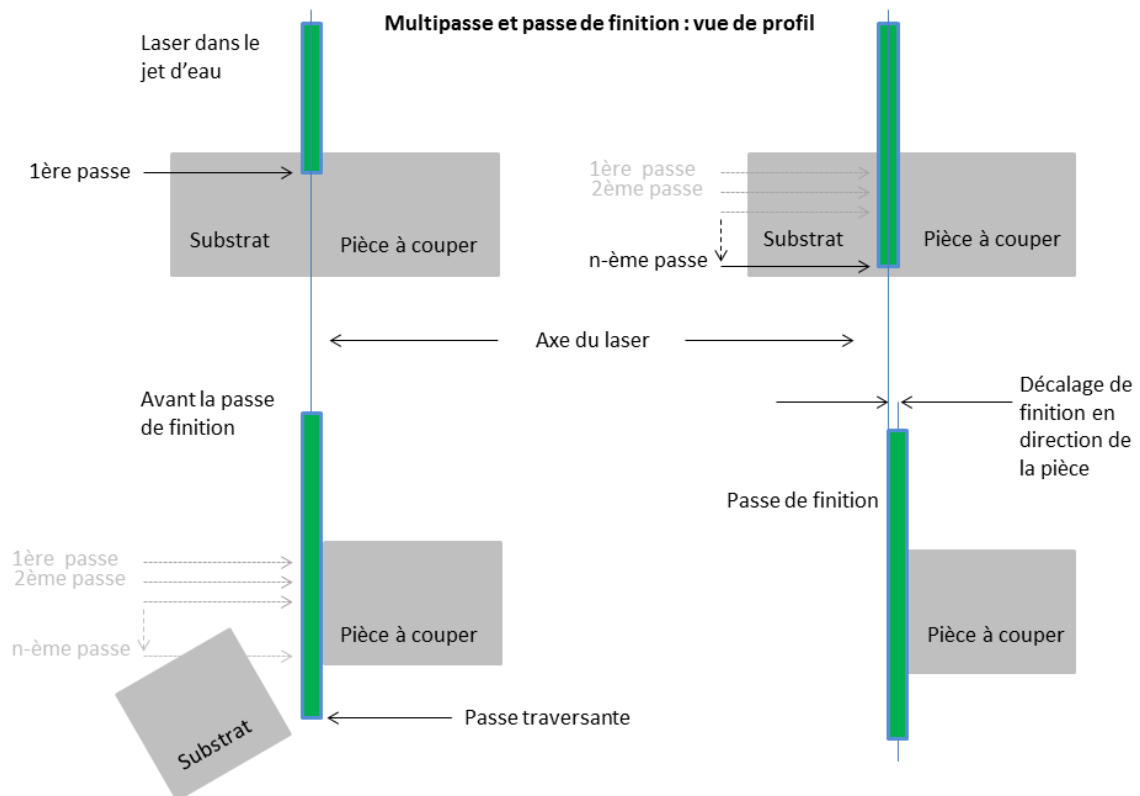


IMAGE 2 : Illustration d'une passe de finition.

Les différents tests pour atteindre les objectifs fixés ont alors été effectués en variant la stratégie de découpe, c'est-à-dire, en observant l'influence de la vitesse, du recours ou non d'une passe de finition, d'une stratégie en monopasse ou en multipasse.

2.3. RÉSULTATS

Nous abordons ici les résultats séparément pour chaque objectif fixé.



IMAGE 3a : Image macroscopique de l'ensemble des platines a et b.

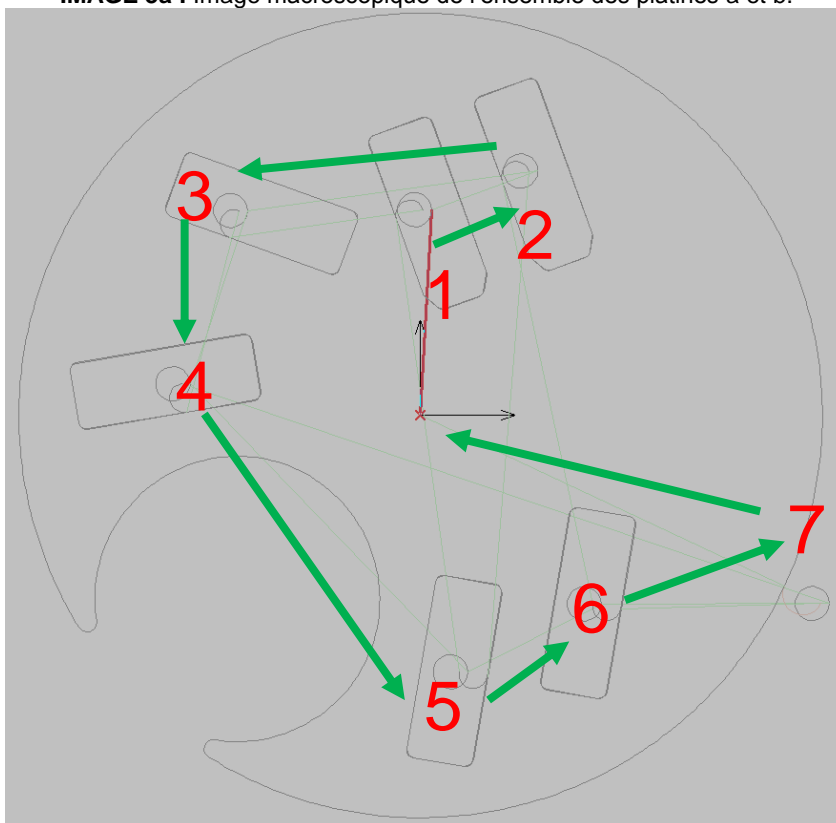


IMAGE 3b : Tracé et ordre de coupe

2.3.1. OPTIMISATION DE LA QUALITÉ DE DÉCOUPE

Le tableau 2 ci-dessous résume les paramètres, la stratégie et le résultat obtenu concernant le temps de découpe.

Matière	Épaisseur [μm]	Paramètres	Stratégie	Nb de passes	Vitesse [mm/s]	Passe de finition		Temps pièce entière [min'sec]
						Décalage [μm]	Vitesse [mm/s]	
FeNi	600	P1	Monop.	1	1	-	-	4'10
FeSi	500	P1	Monop.	1	2	10	1	3'50

TABLEAU 2 : Résumé des paramètres, stratégie de découpe et résultats.

Les images 4, 5 et 6 ci-dessous donnent un aperçu de la qualité obtenue avec 600 µm de FeNi lors de ce développement.

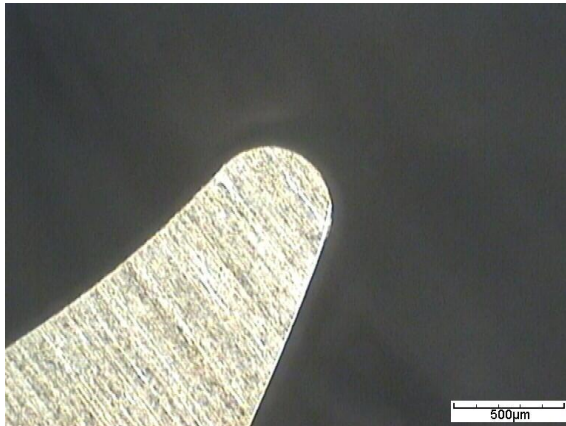


IMAGE 4 : FeNi, vue supérieure, qualité optimale.

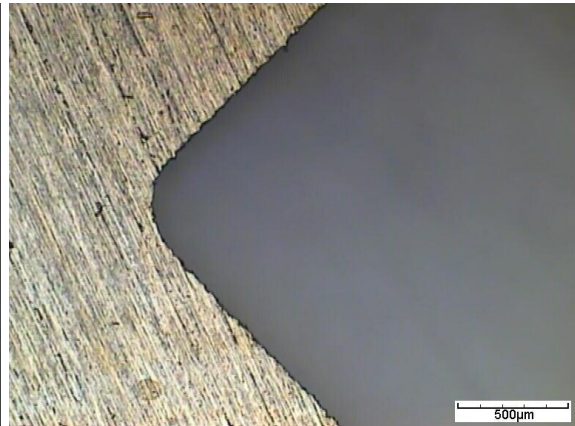


IMAGE 5 : FeNi, vue inférieure, qualité optimale.

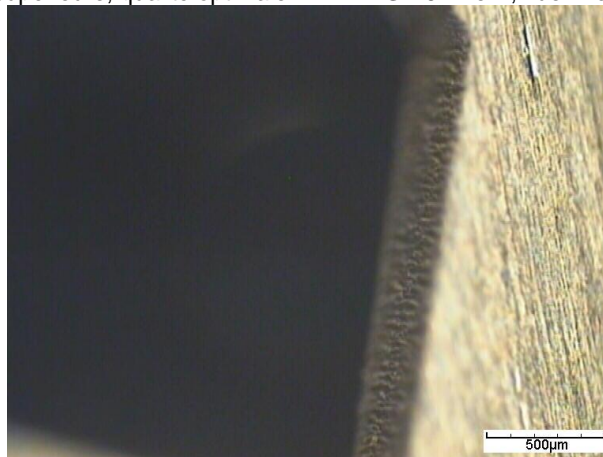


IMAGE 6 : FeNi, vue de profil, qualité optimale.

2.3.2. VITESSE MAXIMALE DE DÉCOUPE

Le tableau 3 ci-dessous résume les paramètres, la stratégie et le résultat obtenu concernant le temps de découpe.

Matière	Épaisseur [µm]	Paramètres	Stratégie	Nb de passes	Vitesse [mm/s]	Passe de finition		Temps pièce entière [min'sec]
						Décalage [µm]	Vitesse [mm/s]	
FeNi	600	P2	Monop.	1	2.7	-	-	1'43
FeSi	500	P2	Monop.	1	3	-	-	1'33

TABLEAU 3 : Résumé des paramètres, stratégie de découpe et résultats.

Les images 7, 8 et 9 ci-dessous donnent un aperçu de la qualité obtenue avec 600 µm de FeNi lors de ce développement.

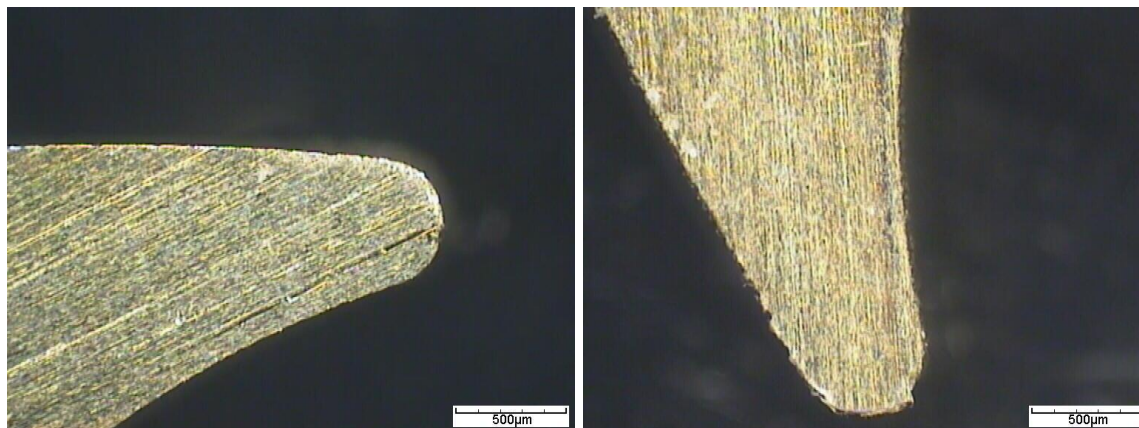


IMAGE 7 : FeNi, vue supérieure, vitesse maximale. **IMAGE 8** : FeNi, vue inférieure, vitesse maximale.

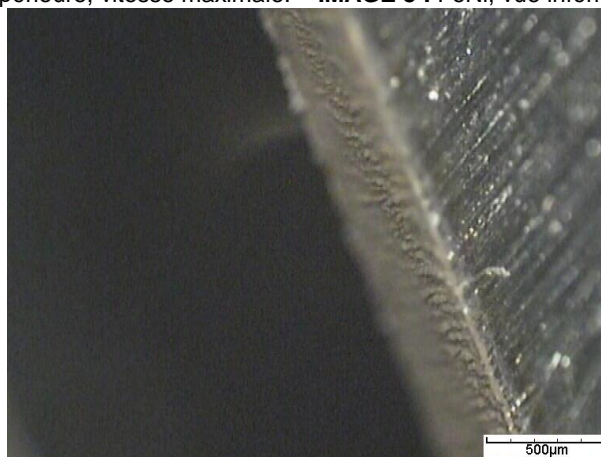


IMAGE 9 : FeNi, vue de profil, vitesse maximale.

2.3.3. RÉALISATION D'UNE OUVERTURE EN UN TEMPS MINIMAL

Pour la réalisation d'une ouverture en un temps minimal (donc à vitesse maximale en référence à 2.3.2.) avec la stratégie monopasse, nous avons pris en compte le temps nécessaire au « start hole ». Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 4 suivant. Les ouvertures correspondent aux points 1 2 3 4 5 et 6 sur l'image 3b.

Matière	Épaisseur [µm]	Paramètres	Stratégie	Nb de passes	Vitesse [mm/s]	Passe de finition		Temps pour une ouverture [sec]
						Décalage [µm]	Vitesse [mm/s]	
FeNi	600	P2	Monop.	1	2.7	-	-	10
FeSi	500	P2	Monop.	1	3	-	-	9

TABEAU 4 : Résumé des paramètres, stratégie de découpe et résultats.

Par essence, les temps de cycle des phases 1 2 3 4 5 6 sont identiques. Par calcul, le temps du contour extérieur (7 sur image 3b) est de 43 secondes dans du FeNi 0.6 et de 39 secondes dans du FeSi 0.5.

Pour les deux échantillons, une ouverture peut donc se réaliser en un temps inférieur à 10 secondes.

2.3.4. OPTIMISATION QUALITÉ-VITESSE

Le temps cible ayant été fixé à 2 minutes, nous avons fait varier nos stratégies de découpe de façon à obtenir une qualité d'ablation optimale en un temps le plus proche possible de deux minutes. Pour ce faire, nous avons utilisé l'ensemble des paramètres laser P1 du tableau 1, et avons principalement travaillé sur l'influence de la vitesse, des passes de finition et des stratégies en monopasse ou en multipasse, sur l'échantillon en FeSi.

Référence pièce	Stratégie	Nb de passes	Vitesse [mm/s]	Passe de finition		Temps pièce entière [min'sec]	Images
				Décalage [μm]	Vitesse [mm/s]		
A	Multipasse	5	10	10	5	2'30	10 à 12
B	Multipasse	4	10	10	5	2'15	13 à 15
C	Multipasse	4	10	10	3	2'00	16 à 18
D	Multipasse	5	12	10	3	2'00	19 à 21
E	Monopasse	1	2	-	-	2'15	22 à 24
F	Monopasse	1	2	10	2	3'05	25 à 27
G	Monopasse	1	2	10	1	4'20	28 à 30

TABLEAU 5 : Résumé des paramètres, stratégies de découpe et résultats.

Ces résultats sont illustrés par les images suivantes. Dans la légende, P.X signifie « pièce X » en référence au tableau 5.

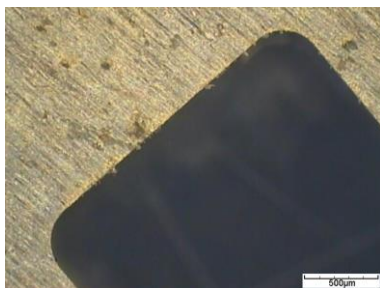


IMAGE 10 : P.A, vue supérieure.

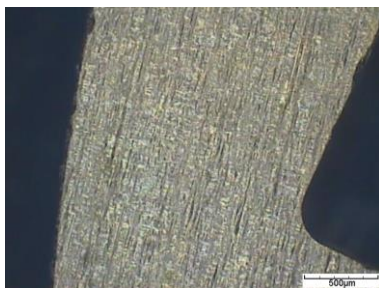


IMAGE 11 : P.A, vue inférieure.

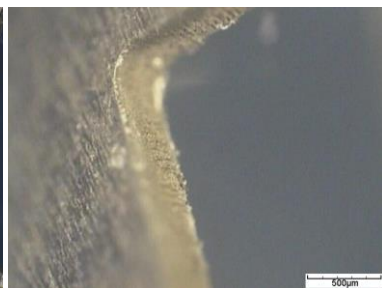


IMAGE 12 : P.A, vue de profil.



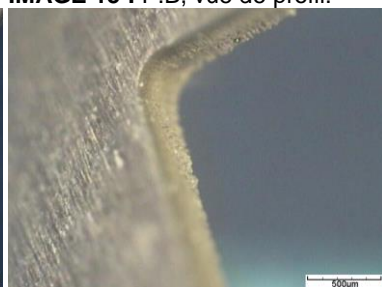
IMAGE 13 : P.B, vue supérieure.



IMAGE 14 : P.B, vue inférieure.



IMAGE 15 : P.B, vue de profil.





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

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1312-4

Echantillon No: 2.2.1310

CONFIDENTIEL

IMAGE 16 : P.C, vue supérieure.



IMAGE 17 : P.C, vue inférieure.

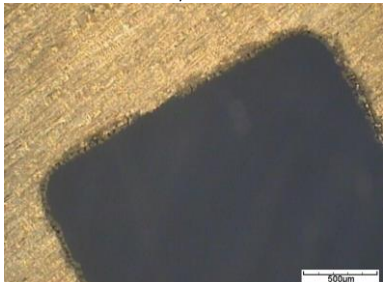


IMAGE 18 : P.C, vue de profil.

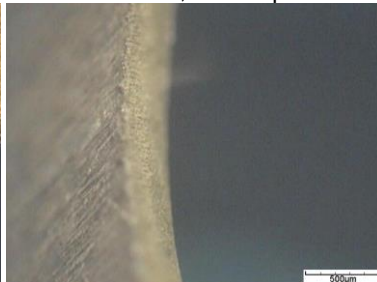


IMAGE 19 : P.D, vue supérieure.



IMAGE 20 : P.D, vue inférieure.



IMAGE 21 : P.D, vue de profil.

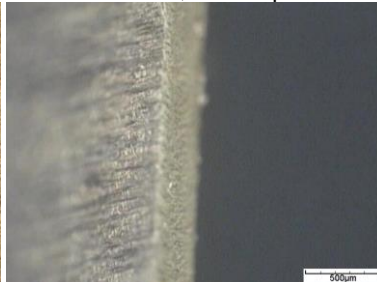


IMAGE 22 : P.E, vue supérieure.

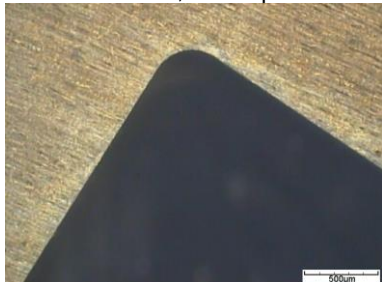


IMAGE 23 : P.E, vue inférieure.



IMAGE 24 : P.E, vue de profil.

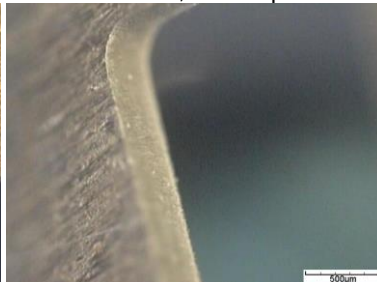


IMAGE 25 : P.F, vue supérieure.



IMAGE 26 : P.F, vue inférieure.

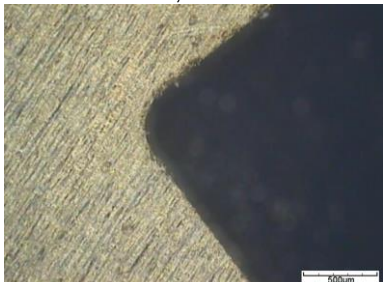


IMAGE 27 : P.F, vue de profil.

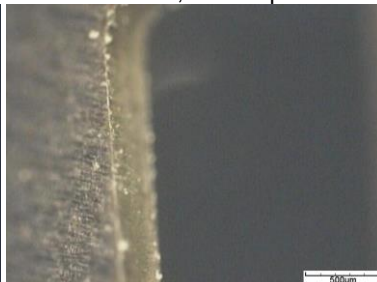


IMAGE 28 : P.G, vue supérieure.

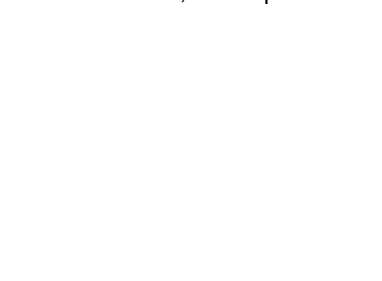


IMAGE 29 : P.G, vue inférieure.

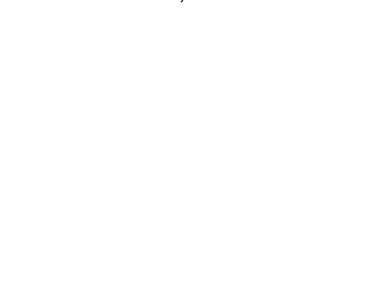
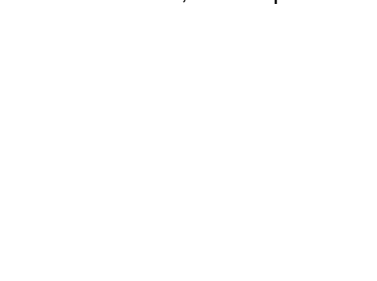


IMAGE 30 : P.G, vue de profil.



 SYNOVA Ch. Dent-d'Oche CH-1024 Ecublens Suisse www.synova.ch	<h1 style="text-align: center;">RAPPORT D'APPLICATION</h1>	Rapport No: 1312-4 Echantillon No: 2.2.1310
		CONFIDENTIEL

2.4. CONCLUSION - PLATINE

Lors de la première itération, la meilleure qualité possible a été atteinte avec une buse de 40 μm , un taux de répétition de 6 kHz et une puissance d'environ 8 W dans le jet d'eau. Bien que la qualité obtenue fut comparable à la meilleure qualité présentée dans ce document, le temps nécessaire était de 13 minutes.

Dans l'actuel développement, une qualité optimale est atteinte en 4 minutes et 10 secondes pour 600 μm de FeNi et en 3 minutes et 50 secondes pour 500 μm de FeSi. Le temps nécessaire a donc été divisé par trois.

Le temps cible pour la découpe d'une platine était fixé à 2 minutes. La vitesse maximale permettant cette découpe est de 3 mm/s pour le FeSi épais de 500 μm et de 2.7 mm/s pour le FeNi épais de 600 μm . Cela donne respectivement un temps de découpe minimal de 1 minute, 33 secondes et 1 minute, 43 secondes. Soit, approximativement 75% du temps souhaité.

Ainsi, le temps de découpe cible est atteint par la technologie LMJ.

Le temps cible pour la découpe d'une ouverture a été fixé à 15 secondes. Avec les mêmes vitesses que celles citées de le paragraphe ci-dessus, nous obtenons des temps de 9 et 10 secondes pour les échantillons en FeSi et en FeNi, respectivement. À nouveau, la technologie LMJ permet donc d'atteindre le temps de découpe cible.

3. DÉCOUPE ALVÉOLE STATOR

Dans cette section, nous reprenons les questions et demandes formulées dans le cahier des charges intitulé « Projet NTC : Laser, découpe alvéole stator, essai 1 ».

3.1. DESCRIPTION


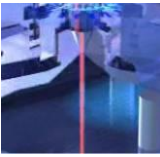

Le tableau ci-dessous résume les différents échantillons reçus.

ECHANTILLONS	Composants	Matière	Épaisseur [µm]	Quantité
	Stator, alvéole	Vacoperm	600	5
	Stator, alvéole carrée	Vacoperm	600	5
	Stator entier	Vacoperm	600	10

3.2 PROCÉDÉ: INSTRUMENT & PARAMÈTRES DE DÉCOUPE

La LCS 300, équipée d'un laser pulsé utilisant la seconde harmonique du Nd:YAG a été déterminée comme la machine disponible dans notre laboratoire la mieux adaptée pour la découpe de vos pièces.

Dans le tableau ci-dessous, vous trouverez l'ensemble des paramètres optimisés et utilisés pour l'intégralité des tests de découpe. Ceux-ci ont été gardés constants lors du développement.

	SYSTÈME	Machine Fixation	LCS300 <i>Pincé</i>
	 PARAMÈTRES DU MICROJET®	Diamètre de buse	40 µm
		Distance de travail	12 mm
		Pression d'eau	300 bar
		Gaz d'assistance	He
		Débit	0.9 L/min
	PARAMÈTRES LASER	Laser	L51G
		Longueur d'onde	532 nm

En fonction des objectifs cités au début de ce document, le développement s'est axé dans un premier temps sur la qualité de la découpe des alvéoles carrées et arrondies. Puis dans un deuxième temps, lors de la réalisation complète des stators, nous avons également cherché à minimiser le temps de découpe, tout en gardant une qualité optimale.

Différents tests préalables nous ont mené au choix des paramètres laser suivants ; ceux-ci garantissant une ablation à la fois propre et rapide dans le vacoperm.



SYNOVA

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

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1312-4

Echantillon No: 2.2.1310

CONFIDENTIEL

PARAMETRES LASER	Paramètres	P3
	Taux de répétitions [kHz]	6
	Temps de pulse [ns]	120
	Puissance laser interne [W]	16.5
	Puissance laser dans le jet [W]	7.1

TABLEAU 6 : Récapitulatif des paramètres laser utilisés.

3.3. RÉSULTATS

Nous abordons ici les résultats séparément pour chaque objectif fixé.



IMAGE 31 : Photographie macroscopique de l'ensemble de stators réalisés.

3.3.1. RÉALISATION D'UNE ALVÉOLE

Le tableau 6 ci-dessous résume les paramètres et résultats obtenus.

Stratégie	Nb de passes	Vitesse [mm/s]	Passe de finition		Temps pour une alvéole arrondie [sec]
			Décalage [μm]	Vitesse [mm/s]	
Monopasse	1	0.6	-	-	2

TABLEAU 6 : Résumé des paramètres, stratégies de découpe et résultats.



SYNOVA

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

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1312-4

Echantillon No: 2.2.1310

CONFIDENTIEL

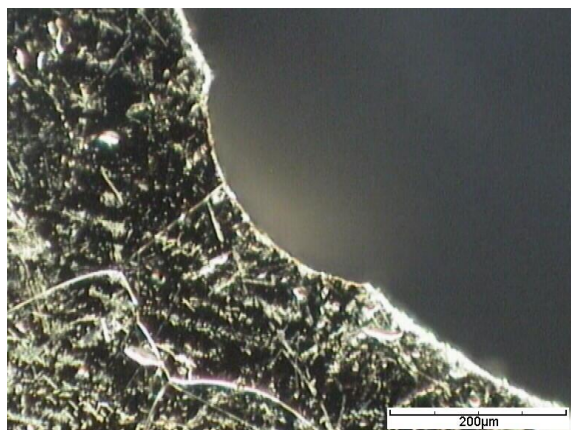


IMAGE 32 : Vue supérieure.

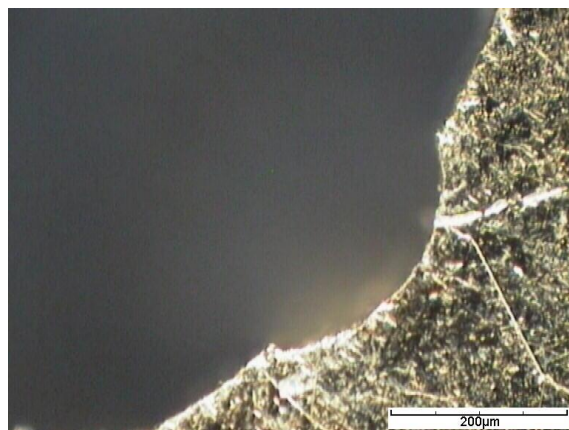


IMAGE 33 : Vue inférieure.

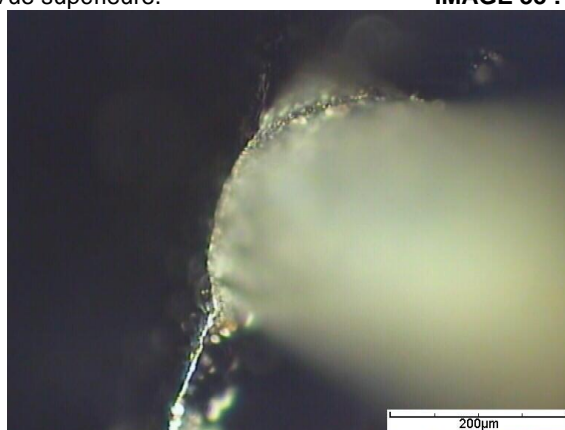


IMAGE 34 : Vue latérale.

3.3.2. RÉALISATION D'UNE ALVÉOLE CARRÉE

Pour réaliser une alvéole carrée, la stratégie choisie était d'entrer en ligne droite dans la matière jusqu'à la profondeur cible. En effet, la taille d'outil de 40 µm s'avère limitante dans le suivi du contour exigé et requis.

Le tableau 7 ci-dessous résume les paramètres et résultats obtenus.

Stratégie	Nb de passes	Vitesse [mm/s]	Passe de finition		Temps pour une alvéole carrée [sec]
			Décalage [µm]	Vitesse [mm/s]	
Monopasse	1	0.6	-	-	1

TABLEAU 7 : Résumé des paramètres, stratégies de découpe et résultats.



SYNOVA

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

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1312-4

Echantillon No: 2.2.1310

CONFIDENTIEL

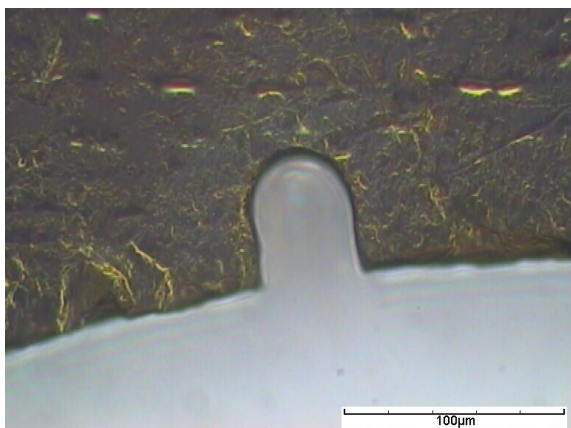


IMAGE 35 : Vue supérieure.

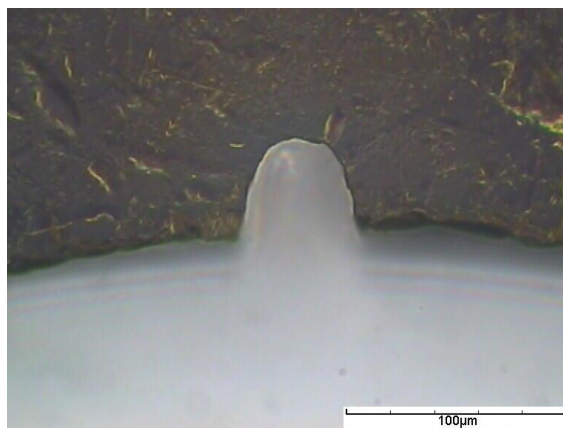


IMAGE 36 : Vue inférieure.

3.3.3. DÉCOUPE D'UN STATOR

Pour la découpe d'un stator complet avec alvéole dans 600 µm de vacoperm, nous avons utilisé le même ensemble de paramètres laser que pour la découpe des alvéoles, c'est-à-dire, l'ensemble P3 du tableau 6.

Stratégie	Nb de passes	Vitesse [mm/s]	Passe de finition		Temps de découpe [min'sec]	Images
			Décalage [µm]	Vitesse [mm/s]		
Monopasse	1	0.4	-	-	2'08	37 à 42
Multipasse	14	10	-	-	1'12	43 à 48

TABLEAU 8 : Résumé des paramètres, stratégies de découpe et résultats.

Les images suivantes donnent une illustration des résultats obtenus.

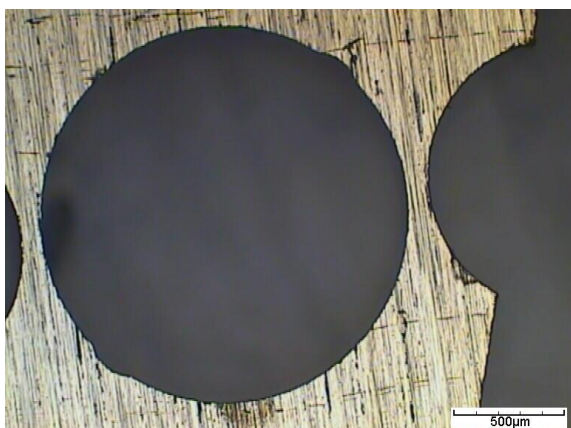


IMAGE 37 : Vue inférieure, monopasse.

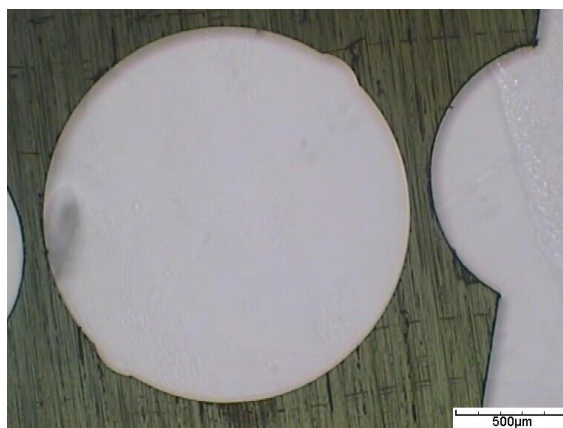


IMAGE 38 : Vue inférieure, monopasse.



SYNOVA

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

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1312-4

Echantillon No: 2.2.1310

CONFIDENTIEL

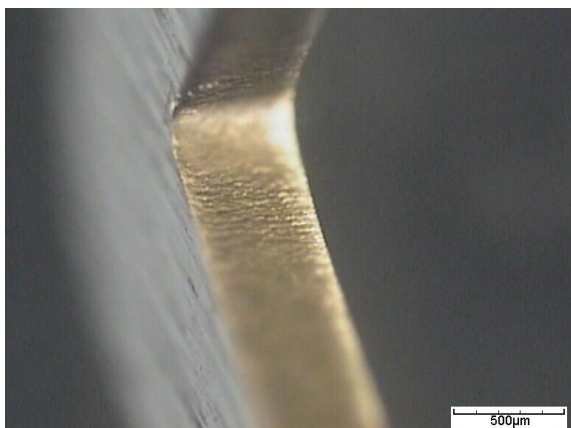


IMAGE 39 : Vue latérale, monopasse.

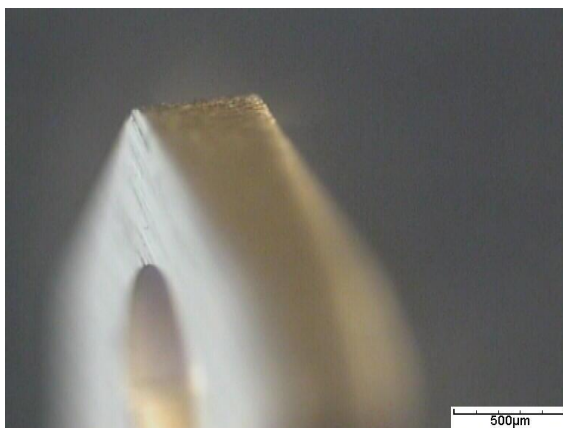


IMAGE 40 : Vue latérale, monopasse.



IMAGE 41 : Vue supérieure, monopasse.

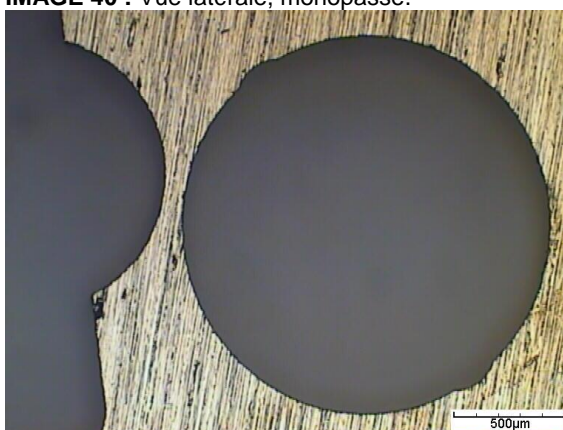


IMAGE 42 : Vue supérieure, monopasse.



IMAGE 43 : Vue inférieure, multipasse.

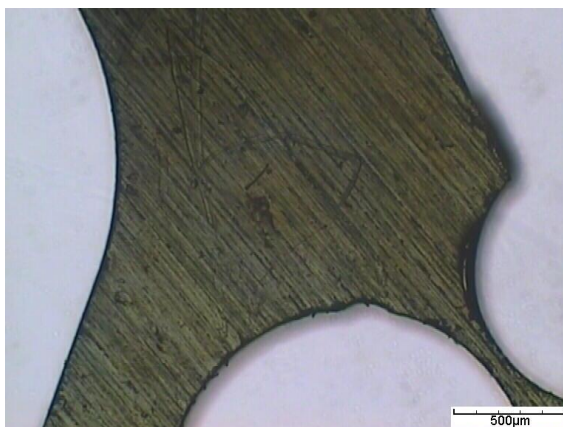


IMAGE 44 : Vue inférieure, multipasse.



SYNOVA

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

RAPPORT D'APPLICATION

Rapport No: 1312-4

Echantillon No: 2.2.1310

CONFIDENTIEL

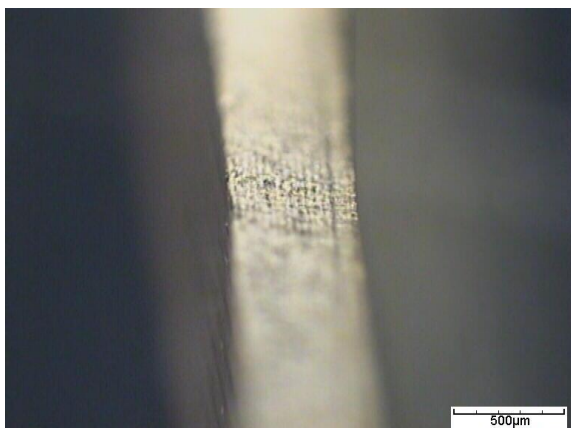


IMAGE 45 : Vue latérale, multipasse.



IMAGE 46 : Vue latérale, multipasse.

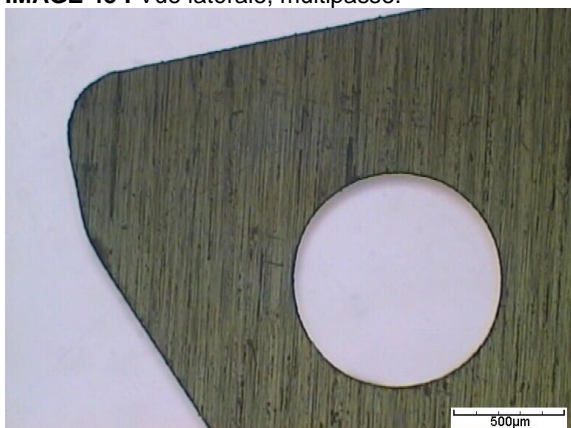


IMAGE 47 : Vue supérieure, multipasse.



IMAGE 48 : Vue supérieure, multipasse.

3.4. CONCLUSION – ALVÉOLE STATOR

La découpe d'alvéole dans 600 µm de vacoperm est réalisable avec la technologie LMJ.

La découpe d'alvéole carrée est plus difficilement accessible au vu des dimensions d'une telle géométrie. Néanmoins, l'utilisation d'une buse d'un diamètre inférieur à 40 µm pourrait diminuer le rayon critique de découpe jusqu'à environ 20 µm, tout en maintenant une qualité de coupe satisfaisante. L'inconvénient de cette solution serait une réduction de la vitesse de coupe.

La découpe complète d'un stator dans 600 µm de vacoperm est réalisable dans des délais de l'ordre de 2 minutes pour une stratégie en monopasse, et d'une minute pour une stratégie en multipasse, ce qui correspond aux exigences définies dans le cahier des charges.

4. CONCLUSION

Les découpes de pièces en FeSi, FeNi et en vacoperm ont été réalisées sur une machine SYNOVA LCS 300. 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 moins de 60 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.

Notons que l'intégralité des objectifs recensés dans les cahiers des charges sont remplis.

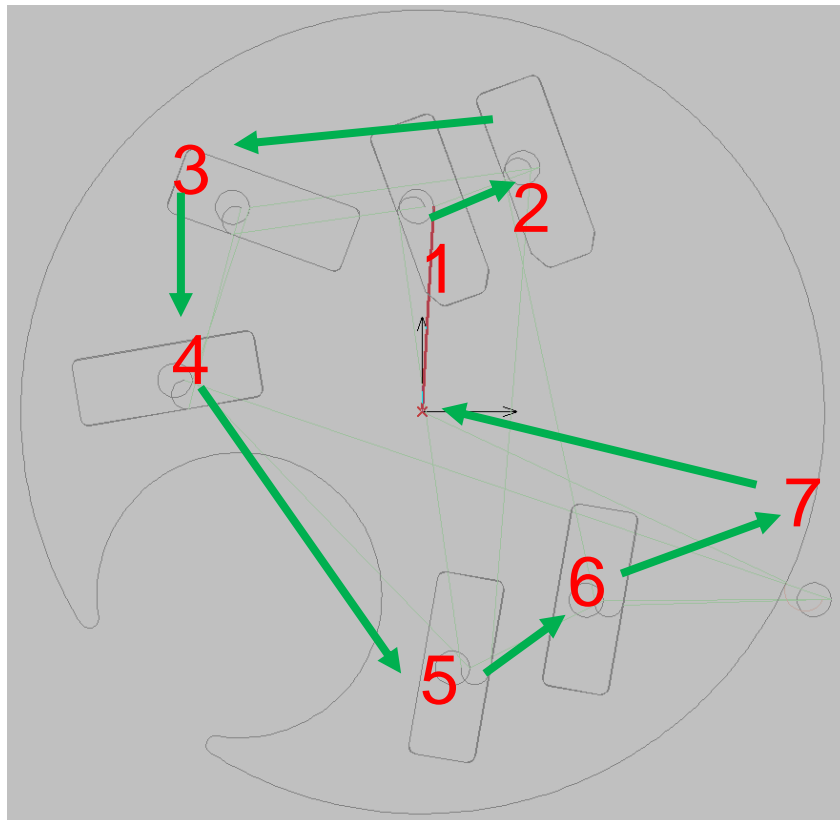
Nous sommes ouverts à l'amélioration concernant vos besoins en termes de :

- L'homogénéité de la rugosité sur le flanc ;
- L'utilisation en industrialisation de cet outil de découpe ;
- L'amélioration du trajet du laser ;
- Le nettoyage et le conditionnement ;
- La stratégie de coupe.

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.

5. RECAPITULATIF DES TEMPS PAR EXIGENCE DE COUPE



Substrat	Qualité optimale				Temps de cycle minimum			
	Vitesse effective	Temps total	temps 1 ouverture	temps contour extérieur	Vitesse effective	Temps total	temps 1 ouverture(*)	temps contour extérieur (**), (***)
	[mm/s]	[min-sec]	[min-sec]	[min-sec]	[mm/s]	[min-sec]	[min-sec]	[min-sec]
FeSi 0.6	1	4' 10"	Non mesuré	Non mesuré	2.7	1'43"	10	43
FeNi 0.5	2	3'50"	Non mesuré	Non mesuré	3	1'33"	9	39

(*) Le temps pour une ouverture correspond au temps de chaque phase 1 2 3 4 5 et 6.

(**) Le temps pour le contour extérieur correspond au temps de la phase 7.

(***) Obtenu par calcul (soustraction du temps total et du temps des 6 ouvertures).