

**(12) BREVET D'INVENTION BELGE**

(47) Date de publication : 19/05/2025

(21) Numéro de demande : BE2023/5869

(22) Date de dépôt : 19/10/2023

(62) Divisé de la demande de base :

(62) Date de dépôt demande de base :

(51) Classification internationale : B23K 26/0622, B23K 26/08, B23K 26/70

(30) Données de priorité :

(73) Titulaire(s) :

**LASER ENGINEERING APPLICATIONS**  
SA  
4102, SERAING  
Belgique

(72) Inventeur(s) :

**BRUNEEL David**  
4920 AYWAILLE  
Belgique

**BRAUN Guillaume**  
4420 SAINT-NICOLAS  
Belgique

**PARENT Michael**  
4520 WANZE  
Belgique

**LEBRUN Léo**  
33140 VILLENAVE-D'ORNON  
France

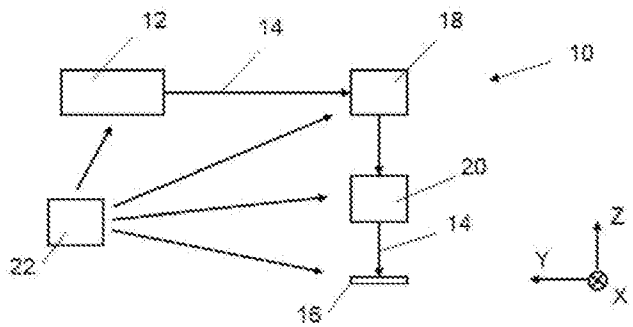
**DUTERTE Charles**  
59241 MASNIERES  
France

**MARTIN Paul-Etienne Martin**  
33770 SALLES  
France

**KUPISIEWICZ Axel**  
4122 NEUPRE  
Belgique

**(54) Procédé de contrôle d'un point de focalisation d'un faisceau laser et dispositif de mise en œuvre**

(57) L'invention concerne un procédé de contrôle d'un point de focalisation d'un faisceau laser émis par une source laser d'impulsions ultra-courtes de haute puissance, le procédé comprenant les étapes de : Fourniture d'une source laser (12) haute puissance; Activation de la source laser; Contrôle du point de focalisation du faisceau laser (14) en imposant un mode rafale à ladite source laser de sorte à générer un faisceau laser comprenant un train d'impulsions comprenant des ensembles d'impulsions laser, les ensembles d'impulsions étant répétées dans le temps. L'invention se rapporte aussi à un dispositif pour la mise en œuvre du procédé.



**Fig. 11**

## **Procédé de contrôle d'un point de focalisation d'un faisceau laser et dispositif de mise en œuvre**

### **Domaine technique**

La présente invention concerne un procédé de contrôle d'un point de focalisation d'un faisceau laser ultra-court et un dispositif de mise en œuvre.

### **Art antérieur**

Il existe différents modes de traitements de pièces avec une source laser.

Par exemple, le document "Generation of Rotationally Symmetric Micro Tools using Ultrashort Laser Pulses" par Julian Zettl et al., JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 15, No. 2, 2020 traite de la fabrication de géométries à symétrie de rotation avec des impulsions laser ultracourtes qui frappent tangentiellement la pièce à usiner en rotation constante. Ce micro-usinage particulier de la géométrie est appelé tournage laser, le faisceau laser étant généralement orienté perpendiculairement à l'axe de rotation et tangentiellement à la pièce à usiner. La géométrie cible est réalisée en déplaçant l'échantillon en rotation constante selon la géométrie spécifiée le long du point laser focalisé. Contrairement au tournage mécanique, le tournage laser induit une quantité minimale de forces latérales par frottement qui pourraient détériorer la géométrie. Dans cette étude, le tournage laser est examiné pour le stellite en fonction de l'énergie et de la longueur des impulsions dans une plage comprise entre 240fs et 10ps. Des longueurs d'impulsion plus courtes et des énergies d'impulsion plus élevées augmentent le taux d'ablation réalisable, tandis que dans le régime de longueur d'impulsion inférieur à 1ps, une rugosité plus faible est obtenue.

Le document "High-Precision Ultrashort-Pulsed Laser Machining of Dental Ceramic Implants" par Norbert Ackerl et al., S0955-2219(18)30672-1, 1 novembre 2018, Journal of the European Ceramic Society, décrit une nouvelle approche pour l'usinage de matériaux durs cylindriques et de formes arbitraires est présentée. Des implants dentaires en zircone durcie à l'alumine et de géométrie complexe sont fabriqués par ablation laser femtoseconde quasi-tangentielle. Cette approche de prototypage rapide pour la production à petite échelle réduit considérablement le

cycle de développement et l'emporte sur les approches conventionnelles. Un processus permettant d'atteindre un taux d'ablation de  $1\text{mm}^3\text{min}^{-1}$  avec une rugosité de surface  $R_a$  de  $0,2\mu\text{m}$  est présenté. La phase tétragonale métastable de la céramique persiste et est évaluée par spectroscopie Raman. La petite zone affectée thermiquement est ensuite ablatée à l'aide d'un laser radial. Il est ainsi possible de produire des implants dentaires de haute précision avec une erreur moyenne inférieure à  $5\mu\text{m}$  sur l'ensemble du contour.

Par la suite, le document WO2022253801 décrit une machine d'usinage d'une pièce présentant un axe de rotation, ladite machine d'usinage comprenant des moyens d'usinage de précision sans force agencés pour usiner la pièce, au moins une première broche, un premier dispositif de serrage agencé pour serrer la pièce à usiner et la monter sur la première broche, et un système de pilotage de paramètres d'usinage. Le système de pilotage est agencé pour piloter des moyens de commande des moyens d'usinage de précision sans force pour commander une première phase d'usinage de la pièce montée sur la première broche programmée pour obtenir une ébauche montée sur la première broche dont les dimensions cibles sont supérieures de 0.5% à 20% aux dimensions finales prédéterminées de la pièce, puis pour modifier les paramètres d'usinage des moyens de commande des moyens d'usinage de précision sans force pour commander, à partir de l'ébauche montée sur la première broche, une deuxième phase d'usinage par enlèvement de quantité de matière suffisamment faible pour obtenir la pièce finie montée sur la première broche aux dimensions finales prédéterminées et présentant une  $R_a$  inférieure à 40nm. Ce document décrit aussi un procédé d'usinage d'une pièce au moyen d'une telle machine d'usinage.

Le document "CAM solution for quasi-tangential laser ablation of complex 3D workpieces" par Norbert Ackerl et al, LIM 2019, décrit un calcul des trajectoires d'ablation laser et des hachures pour des géométries 3D complexes. Le document "Ultra-short pulsed laser conditioning of metallic-bonded diamond" par Norbert Ackerl et al., Materials and Design 189 (2020) 108530, décrit des stratégies et des processus d'une configuration sans tête de balayage utilisant un laser à impulsions ultracourtes.

L'inconvénient des procédés et dispositifs décrits dans ces documents est qu'il n'y a pas de contrôle de la stabilité du faisceau laser durant le traitement des pièces. En conséquence, la qualité du traitement est dégradée.

Il y a un besoin pour un procédé assurant la stabilité d'un faisceau laser.

## 5 Exposé de l'invention

À cet effet, l'invention propose un procédé de contrôle d'un point de focalisation d'un faisceau laser émis par une source laser d'impulsions ultracourtes de haute puissance, le procédé comprenant les étapes de Fourniture d'une source laser haute puissance ; Activation de la source laser ; Contrôle du point de focalisation du faisceau laser en imposant un mode rafale à ladite source laser de sorte à générer un faisceau laser comprenant un train d'impulsions comprenant des ensembles d'impulsions laser, les ensembles d'impulsions étant répétées dans le temps.

Selon une variante, le point de focalisation est contrôlé selon une direction de propagation du faisceau laser et/ou dans lequel le point de focalisation est contrôlé en contrôlant la taille du point de focalisation et/ou dans lequel le point de focalisation est contrôlé dans un plan transversal à une direction de propagation principale dudit faisceau laser.

Selon une variante, le procédé comprend en outre, le réglage du point de focalisation du faisceau laser.

Selon une variante, la source laser a une puissance supérieure à 2W, de préférence supérieure à 20W.

Selon une variante, la source laser a une puissance supérieure à 2W pour des longueurs d'onde dans l'ultraviolet, une puissance supérieure à 5W pour des longueurs d'onde dans le visible, ou une puissance supérieure à 10W pour des longueurs d'onde dans l'infrarouge.

Selon une variante, les impulsions de la source laser ont une durée comprise inférieure à 10ps.

Selon une variante, le procédé comprend en outre une variation de la puissance avec le faisceau laser.

Selon une variante, chacun des ensembles d'impulsions laser comprend une première impulsion et une seconde impulsion avec un intervalle de temps entre les impulsions compris entre 0,1ns et 100ns, de préférence entre 0,2ns et 20ns.

5 Selon une variante, les ensembles d'impulsions sont répétés dans le temps avec un intervalle de temps entre les ensembles d'impulsions compris entre 100ns et 1ms, de préférence entre 500ns et 20 $\mu$ s.

Selon une variante, le procédé comprend en outre un traitement d'une pièce par le faisceau laser en imposant le mode rafale à la source laser.

10 Selon une variante, le traitement de la pièce est une structuration de la surface de la pièce ou un usinage de la pièce.

Selon une variante, le traitement de la pièce est un usinage réalisé sur une pièce à plat.

Selon une variante, le traitement de la pièce est un usinage réalisé par rotation de la pièce.

15 Selon une variante, une pièce est entraînée en rotation et dans lequel l'angle d'incidence entre le faisceau laser et la surface de la pièce est compris entre 50° et 85°, de préférence compris entre 65° et 80°.

20 Selon une variante, une géométrie est usinée sur la pièce de manière répétitive par le faisceau laser selon une fréquence de répétition de suivi d'une géométrie et dans lequel le faisceau laser est appliqué de manière répétitive sur la pièce selon une fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce, le ratio entre la fréquence de répétition de suivi d'une géométrie et la fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce est un nombre irrationnel.

25 Selon une variante, le nombre irrationnel est le nombre pi, racine carrée de 2 ou le nombre d'or ou l'inverse de ces nombres, éventuellement modulo un entier.

Selon une variante, le traitement est fait selon une passe d'ébauche et une passe de finition, la passe de finition étant réalisé en imposant un mode rafale à la source laser.

30 Selon une variante, la passe d'ébauche est réalisée en imposant un mode impulsion unique à la source laser ou un mode rafale à la source laser.

L'invention se rapporte aussi à un dispositif pour la mise en œuvre du procédé tel que décrit précédemment.

L'usage, dans ce document, du verbe « comprendre », de ses variantes, ainsi que ses conjugaisons, ne peut en aucune façon exclure la présence d'éléments  
5 autres que ceux mentionnés. L'usage, dans ce document, de l'article indéfini « un », « une », ou de l'article défini « le », « la » ou « l' », pour introduire un élément n'exclut pas la présence d'une pluralité de ces éléments.

Les termes « premier », « deuxième », « troisième », etc. sont, quant à eux, utilisés dans le cadre de ce document exclusivement pour différencier différents  
10 éléments, et ce sans impliquer d'ordre entre ces éléments.

L'ensemble des modes de réalisation préférés ainsi que l'ensemble des avantages du procédé selon l'invention se transposent mutatis mutandis au présent dispositif et inversement. Les différents modes de réalisation peuvent être considérés seuls ou en combinaison.

## 15 **Brève description des figures**

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui suit pour la compréhension de laquelle on se reportera aux figures annexées qui montrent :

- Figure 1, un mode rafale de fonctionnement du faisceau laser ;
- 20 - - Figure 2, la propagation d'un faisceau Gaussien ;
- Figure 3, une mesure expérimentale du diamètre de faisceau à faible puissance servant de référence ;
- Figure 4, des mesures expérimentales de l'évolution du diamètre de faisceau en fonction de la puissance en mode impulsion unique ;
- 25 - Figure 5, des mesures expérimentales de diamètres de point laser pour le mode rafale avec différents nombres d'impulsions ;
- Figures 6a et 6b, une évolution du diamètre de point laser en fonction de la puissance en mode impulsion unique ;
- Figure 7, l'évolution de diamètre du point laser en mode rafale ;
- 30 - Figure 8, une mesure de dépointé à faible puissance ;

- Figure 9, une mesure de dépointé à haute puissance en mode impulsion unique ;
- Figure 10, une mesure de dépointé à haute puissance en mode rafale ;
- Figure 11, un dispositif de mise en œuvre du procédé de l'invention ;
- Figure 12, un schéma de principe pour déterminer l'angle d'incidence  $\alpha$  ;
- 5 - Figure 13, une représentation de l'évolution du diamètre en fonction du nombre de passes d'usinages pour trois tests dans des conditions identiques ;
- Figure 14, l'évolution du volume ablaté en fonction de l'angle d'incidence du laser sur la surface
- Figure 15, un usinage à plat d'une pièce ;
- 10 - Figure 16, un usinage en tournage d'une pièce ;
- Figure 17, une comparaison de l'écart de la cote nominale pour différents diamètres usinés en mode impulsion unique et en mode rafale.

Les dessins des figures ne sont pas à l'échelle. Des éléments semblables sont en général dénotés par des références semblables dans les figures. Dans le

15 cadre du présent document, les éléments identiques ou analogues peuvent porter les mêmes références. En outre, la présence de numéros ou lettres de référence aux dessins ne peut être considérée comme limitative, y compris lorsque ces numéros ou lettres sont indiqués dans les revendications.

### **Description détaillée de modes de réalisation de l'invention**

20 L'invention se rapporte à un procédé de contrôle du point de focalisation d'un faisceau laser émis par une source laser d'impulsions ultra-courtes de haute puissance. Le procédé comprenant les étapes de fourniture d'une source laser haute puissance, d'activation de la source laser; de contrôle du point de focalisation du faisceau laser en imposant un mode rafale à ladite source laser de sorte à

25 générer un faisceau laser comprenant un train d'impulsions comprenant des ensembles d'impulsions laser, les ensembles d'impulsions étant répétées dans le temps. Le procédé vise de contrôler le point de focalisation du faisceau laser afin de maîtriser la stabilité du faisceau laser.

Le procédé résout les problèmes pouvant arriver avec l'utilisation de sources

30 laser à impulsions ultra-courtes (par exemple de 150fs à 10ps) de plus en plus

puissantes (par exemple, d'une puissance supérieure à 20W et/ou avec une énergie supérieure à 100 $\mu$ J), ainsi que la faculté de les doubler (dans les longueurs d'onde visibles VIS), tripler ou quadrupler (dans les longueurs d'onde UV) en fréquence de la lumière. Les problèmes liés à cette instabilité à haute puissance en général sont extrêmement préoccupants pour des procédés demandant une haute productivité et garantissant une haute précision. Ceci est en particulier le cas (mais pas uniquement) lors d'un traitement en rotation (faisceau tangentiel) car le point de focalisation est modifié dans un plan en XY mais aussi en hauteur, selon une direction Z, ce qui implique des problèmes de précision et d'efficacité (effet bouclier du plasma généré).

Dans ce qui suit, on entend par point laser ou spot ou spot laser ou tâche laser une étendue du faisceau laser transversalement à la direction de propagation principale du faisceau laser à une coordonnée le long de cette direction de propagation principale, de préférence au niveau d'un plan focal. Le mode rafale (ou mode « burst ») se différencie d'un mode impulsion unique (ou « single shot ») en ce que le mode rafale comprend des ensembles d'impulsions laser séparés par des intervalles de temps (les impulsions au sein des ensembles étant aussi séparés par des intervalles de temps, inférieurs) alors que le mode impulsion unique ne comprend que des impulsions laser uniques séparées par des intervalles de temps.

Le procédé comprend la fourniture d'une source laser. La source laser est une source laser haute puissance. La puissance de la source laser haute puissance est d'au moins 2W. La puissance peut être de 20W ou plus. Une source laser haute puissance permet l'augmentation en productivité d'un procédé de traitement au laser. En effet l'efficacité d'un usinage se quantifie par le volume ablaté par unité de puissance laser par unité de temps ( $\text{mm}^3/\text{W}\cdot\text{min}$ ). Ainsi, plus la puissance du laser est élevée, plus le volume ablaté par unité de temps est élevé. La source laser est à une haute énergie, par exemple supérieure à 5 $\mu$ J, supérieure à 20 $\mu$ J voire 40 $\mu$ J, voire supérieure à 100 $\mu$ J. En fonction des longueurs d'onde, l'énergie peut être supérieure à 5 $\mu$ J pour des longueurs d'onde dans l'ultraviolet, supérieure à 20 $\mu$ J pour des longueurs d'onde dans visible, et supérieure à 100 $\mu$ J pour des longueurs d'onde dans l'infra-rouge. L'énergie peut dépendre de la puissance et

des longueur d'onde. La source laser peut avoir une puissance supérieure à 2W pour des longueurs d'onde dans l'ultraviolet, une puissance supérieure à 5W pour des longueurs d'onde dans le visible, ou une puissance supérieure à 10W pour des longueurs d'onde dans l'infrarouge. La puissance de la source laser peut être  
5 supérieure à 20W, voire 40W, en particulier pour des longueur d'onde dans l'infrarouge, que ce soit en mode impulsion unique ou en mode rafale. L'énergie par impulsion peut être supérieure à 100 $\mu$ J. Les seuils peuvent être diminués lors de l'utilisation d'un générateur d'harmonique. La puissance peut être supérieure à 10W et l'énergie supérieure à 40 $\mu$ J pour des longueurs d'onde dans le visible. La  
10 puissance peut être supérieure à 5W et l'énergie supérieure à 6 $\mu$ J pour des longueurs d'onde dans l'ultraviolet.

Le procédé comprend l'activation de la source laser puis le contrôle du point de focalisation du faisceau laser en imposant un mode rafale à ladite source laser de sorte à générer un faisceau laser comprenant un train d'impulsions comprenant  
15 des ensembles d'impulsions laser, les ensembles d'impulsions étant répétées dans le temps.

La source laser est capable de générer le faisceau laser en mode rafale. Le mode rafale est représenté sur la figure 1 à titre d'exemple. Le mode rafale est caractérisé par un train 24 d'impulsions comprenant des ensembles 26  
20 d'impulsions 28 laser. Les ensembles 26 d'impulsions sont séparés les uns des autres par un intervalle 30 de temps. A titre d'exemple, l'intervalle 30 de temps peut être compris entre 100ns et 1ms, de préférence entre 500ns et 20 $\mu$ s. Le choix peut dépendre du matériau traité ; plus la sensibilité du matériau à la chaleur augmente plus l'intervalle 30 augmente. La source laser est paramétrée en mode rafale. Le  
25 mode rafale permet de délivrer une dose d'énergie élevée. La même dose d'énergie est délivrée en mode rafale qu'avec un mode à impulsion unique, mais répartie sur plusieurs impulsions. Le mode rafale permet d'utiliser l'énergie de manière plus efficace qu'avec une unique impulsion. Étant donné que la même quantité d'énergie est délivrée en au moins deux impulsions, l'énergie délivrée par la première  
30 impulsion est stockée et une densité d'énergie relativement faible est ensuite nécessaire pour la deuxième impulsion et ainsi de suite. La densité énergétique de

l'impulsion d'un ensemble permettant le traitement étant relativement faible, une bonne gestion dans l'espace de l'impulsion est possible et l'énergie délivrée par ladite impulsion ne se répand pas ou ne se diffuse pas autour d'elle. Par exemple, l'intervalle 32 de temps entre la première impulsion 28 et la deuxième impulsion 28  
5 est compris entre 0,1ns et 100ns, de préférence entre 0,2ns et 20ns. Le paramétrage du mode rafale est déterminé en fonction de l'ablation optimale, à savoir retirer le maximum de matière en un minimum de temps, sans dégrader la pièce traitée. En outre, le paramétrage du mode rafale permet de faire varier la durée des intervalles 30 et/ou 32 – ce qui permet de s'adapter au mouvement du  
10 laser par rapport à la pièce, ainsi que des caractéristiques de la pièce.

Dans le cadre de l'invention, le contrôle du point de focalisation ne signifie pas le réglage du point de focalisation. En d'autres termes, selon l'invention, le point de focalisation est sous contrôle après activation de la source laser ou encore, le point de focalisation est maintenu après activation de la source laser, ou encore, le point  
15 de focalisation est stabilisé après activation de la source laser. Cela évite une modification du plan focal, une modification du plan focal étant nuisible à la qualité du faisceau laser délivré. En effet, la modification du plan focal ne permet pas d'opérer la source laser comme prévu lors du paramétrage du laser. Le procédé de l'invention évite aussi l'apparition d'effets thermiques non souhaités.  
20 Indépendamment de tout traitement d'une pièce à l'aide d'un laser, le procédé de l'invention assure la stabilité et la précision du point laser.

La figure 2 représente la propagation d'un faisceau Gaussien et représente le diamètre du faisceau  $w$  en fonction d'une distance de propagation  $z$ . Le point de focalisation correspond à la position  $z$  selon la direction  $Z$  à laquelle le diamètre du  
25 faisceau est minimal ( $w=0$ ). Ceci est indiquée à une distance  $z=0$  selon une direction  $Z$  de propagation du faisceau laser. Le profil de faisceau ainsi simulé montre la divergence du faisceau selon la direction  $Z$ . Changer la position du point de focalisation provoque le changement de la taille du faisceau dans la direction  $Z$ , ce qui altère les propriétés du point laser et donc affecte le traitement d'une pièce.

30 Le procédé peut comprendre le réglage du point de focalisation du faisceau. Le réglage du point de focalisation est réalisé avant le traitement d'une pièce. Par

exemple, le réglage du point de focalisation est fait par localisation du point de focalisation et la pièce à traiter dans l'espace. Puis la pièce est convenablement positionnée. Par la suite, durant l'application du mode rafale, le point de focalisation est contrôlé par maintien du point de focalisation au réglage antérieur – ce qui est

5 une étape différente du réglage du point de focalisation.

Le contrôle du point de focalisation peut être opéré selon différentes manières, prises individuellement ou en combinaison. Par exemple, le point de focalisation est contrôlé selon la direction Z de propagation du faisceau laser. On voit selon la figure 2 que le déplacement de la position du point de focalisation selon la direction Z fait

10 varier le diamètre du faisceau laser selon la direction Z. Le contrôle du point de focalisation selon la direction Z, avec le faisceau laser en mode rafale, permet donc d'éviter une telle variation de diamètre. Selon un autre exemple, le contrôle du point de focalisation se traduit par le contrôle de la taille du point de focalisation. Indépendamment du déplacement du point de focalisation selon la direction Z (mais

15 possiblement en combinaison), la taille du point de focalisation peut changer, en particulier pour des laser de hautes puissances. Sur la figure 2, pour une même valeur z selon la direction Z, le diamètre w du faisceau laser (et donc la taille du faisceau laser) peut changer. Le contrôle du point de focalisation, avec le faisceau laser en mode rafale, permet donc d'éviter une telle variation de diamètre. Le

20 contrôle du point de focalisation permet donc une bonne stabilité du faisceau laser. Selon un autre exemple encore, le point de focalisation est contrôlé dans un plan transversal à une direction de propagation principale dudit faisceau laser. Le procédé de contrôle assure un contrôle de stabilité du faisceau laser dans un plan transversal à une direction de propagation principale dudit faisceau laser en

25 imposant le mode rafale. Ceci permet d'éviter que le faisceau laser varie dans la direction X et/ou la direction Y (directions transversales à la direction Z de propagation du laser) à travers le temps. On contrôle la position du point de focalisation dans la direction X et/ou la direction Y. Ce phénomène est le dépointé pouvant amener de l'instabilité au cours de l'utilisation d'une source laser.

30 L'application du mode rafale au faisceau laser permet le contrôle de la stabilité du faisceau laser. Le contrôle du point de focalisation selon la direction Z selon

l'invention est d'autant plus important au fur et à mesure que la fréquence de la source laser augmente (de l'infrarouge, au visible, à l'ultraviolet). L'application d'une énergie supérieure à  $100\mu\text{J}$  en infra-rouge, supérieure à  $20\mu\text{J}$  en visible et supérieure à  $5\mu\text{J}$  en ultraviolet permet selon l'invention de contrôler le point de focalisation.

5 Afin d'avoir un procédé stable, maîtrisable et répétable, il est avantageux de connaître ces manières de contrôler le point de focalisation, à savoir le contrôle du point de focalisation selon une direction Z de propagation du faisceau laser et/ou le contrôle du point de focalisation en contrôlant la taille du point de focalisation et/ou

10 le contrôle du point de focalisation dans un plan transversal à une direction de propagation principale dudit faisceau laser.

Une variation de focalisation (ou changement de focalisation) apparaît lorsque le plan focal se déplace. Ceci peut se produire par exemple lors d'une variation de puissance par exemple. Ce phénomène peut être nuisible lors du traitement d'une

15 pièce, un usinage par exemple, car le traitement de la pièce (l'usinage) ne se fera plus au point de focalisation mais en amont ou en aval de celui-ci. Ceci aurait des répercussions sur la qualité de l'usinage car il peut amener à des effets thermiques non souhaités. Il est donc important de pouvoir quantifier le déplacement du plan focal afin de pouvoir compenser les effets non désirés. Afin d'assurer stabilité et

20 reproductibilité du procédé, il est avantageux de contrôler le point de focalisation selon une direction Z de propagation du faisceau, et pour cela, de connaître et maîtriser la variation de focalisation.

Le matériel utilisé est un système optique de mesure de grande résolution. La méthode de travail est par exemple la mesure de la caustique du faisceau (ou

25 enveloppe du faisceau) avant et après point de focalisation.

La première étape afin de pouvoir quantifier la variation de focalisation est de trouver le plan focal à faible puissance. En effet, il est très peu probable d'avoir de la variation de focalisation pour des puissances faibles, aux alentours de  $0.05\text{W}$ . Ce plan focal servira de référence pour quantifier le déplacement en z du plan focal

30 pour les autres conditions.

Le principe est de mesurer les tailles de point laser au plan focal de référence (basse puissance) et de faire varier par un pas défini la valeur de Z, en l'occurrence de -0.6mm à +0.6mm par pas de 0.15mm. La variation des tailles de points laser permettent de définir la caustique du laser et donc de définir le niveau de variation  
5 de focalisation – ou auto-focalisation.

Pour cette étude, plusieurs paramètres ont été testés : en mode impulsion unique, en mode rafale avec différents intervalles de temps 28 au-dessus ou en-dessous de 1ns. La mesure de référence est effectuée à une puissance moyenne de 0.01W (fréquence de 20kHz et énergie par impulsion de 0.52 $\mu$ J). La figure 3 est  
10 une mesure expérimentale du diamètre de faisceau à faible puissance servant de référence. La figure 3 montre l'évolution du diamètre de faisceau à faible puissance. En abscisses la hauteur Z (mm) et en ordonnées la taille T du point laser ( $\mu$ m). La valeur pour Z=0 représente la taille de point laser au plan focal et mesure environ 12.61 $\mu$ m. Les tests en mode impulsion unique ont été effectués à une fréquence  
15 fixe de 100kHz. Les tests sont faits au-dessus et en-dessous de Z=0. Le but de cette étape est de déterminer le seuil d'apparition du phénomène d'auto-focalisation.

La figure 4 représente des mesures expérimentales de l'évolution du diamètre de faisceau en fonction de la puissance en mode impulsion unique. La figure 4  
20 montre des diamètres de faisceau en fonction de la puissance en mode impulsion unique. En abscisses la hauteur Z (mm) et en ordonnées la taille T du point laser ( $\mu$ m). On voit que le point de focalisation ne se trouve plus à une valeur de Z=0 entre 0.7W et 2.2W, et plus précisément à 1,77W.

Les mesures suivantes permettent de quantifier la variation de focalisation  
25 pour le mode rafale avec une puissance équivalente au mode impulsion unique, à savoir 8W pour la puissance maximale. Il est à noter qu'il a été possible d'atteindre les 8W avec deux et trois impulsions par rafale mais aussi au-delà de trois impulsions.

La figure 5 montre des mesures expérimentales de diamètres de point laser  
30 pour le mode rafale avec différents nombres d'impulsions (2 à 5 impulsions) par ensemble d'impulsions (ou par rafale). La figure 5 montre l'évolution du diamètre

de faisceau en fonction du nombre d'impulsions par rafale. En abscisses la hauteur Z (mm) et en ordonnées la taille T du point laser ( $\mu\text{m}$ ). La courbe 61 est dans le cas de 2 impulsions par rafale pour une puissance de 8W. La courbe 62 est dans le cas de 3 impulsions par rafale pour une puissance de 8W. La courbe 63 est dans le cas de 4 impulsions par rafale pour une puissance de 6 W. La courbe 64 est dans le cas de 5 impulsions par rafale pour une puissance de 4,9W. Pour le mode rafale, la figure 5 montre que la variation de focalisation ne se produit pas.

Afin d'assurer stabilité et reproductibilité du procédé, il est avantageux de contrôler le point de focalisation en connaissant et maîtrisant la taille de point laser. En effet, il est avantageux de connaître la taille de l'outil de travail afin de pouvoir transposer les paramètres de procédé d'un dispositif à un autre. La connaissance cette valeur pour différentes conditions de travail est avantageuse.

A titre d'exemple, le matériel utilisé est un système optique de mesure de grande résolution. Il est à noter que la mesure de la taille de point laser se fait au plan focal. Pour trouver ce plan focal, on fait varier la hauteur d'une lentille de focalisation d'un dispositif de traitement d'une pièce jusqu'à obtenir le point laser le plus petit possible.

Différentes conditions ont été étudiées :

- Faible puissance (allant jusqu'à 0.05W)
- Haute puissance en mode impulsion unique (>8W)
- Haute puissance en mode burst (>8W).

Des conditions intermédiaires ont également été étudiées afin d'observer d'éventuelles modifications de la taille de point laser en fonction des conditions de travail. Il a été observé que la taille de point laser n'était pas une valeur fixe en mode impulsion unique. En effet, celle-ci varie en fonction des conditions de la source laser.

Les figures 6 montrent une évolution du diamètre de point laser en fonction de la puissance en mode impulsion unique à 100 kHz et 200kHz. La puissance P (W) est en abscisse et le diamètre D ( $\mu\text{m}$ ) de point laser en ordonnées. La variation de la taille de point laser n'est pas linéaire en fonction de la puissance. En effet, le diamètre de point laser est plus gros à faible puissance (12  $\mu\text{m}$  pour 0.7W) et décroît

jusque 5W environ (9 $\mu$ m) avant d'augmenter. La figure 7, montre l'évolution de diamètre du point laser en mode rafale. La puissance P (W) est en abscisse et le diamètre D ( $\mu$ m) de point laser en ordonnées. On voit que le diamètre de point laser est stable.

- 5 Afin d'assurer stabilité et reproductibilité du procédé, il est avantageux de contrôler le point de focalisation en connaissant et en maîtrisant la position du point de focalisation dans un plan transversal à une direction de propagation principale dudit faisceau laser – le dépointé. On se place d'abord dans les conditions pratiques (puissance laser, fréquence, mode, etc...) et on laisse la source laser tirer pendant
- 10 au moins 30min avant le début de la mesure pour s'affranchir d'éventuels problèmes dû à la thermique du système ou de ses composants. On relève ensuite la cadence d'acquisition des données ainsi que le temps d'acquisition.

Trois cas sont envisagés :

- Basse puissance (environ 0.05W)
- 15 - Haute puissance en mode impulsion unique (>8W)
- Haute puissance en mode rafale à deux impulsions (>8W)

- La mesure à basse puissance permet d'avoir une référence où les effets de dépointés doivent être les plus petits. En effet, la basse puissance ainsi que les faibles énergies par impulsion n'induisent pas d'effets thermiques et donc moins de
- 20 dépointé. Les deux autres mesures à hautes puissances sont par exemple des conditions qui pourraient servir pour un usinage. La différence principale est que pour le mode rafale, il y a deux impulsions espacées par un intervalle de temps alors qu'en mode impulsion unique il n'y a qu'une impulsion. Il y a donc moins d'énergies par impulsions pour le mode rafale que pour le mode impulsion unique
- 25 mais la fluence reste identique.

- Les données les plus intéressantes pour la caractérisation du dépointé sont la moyenne, l'écart-type et la périodicité (s'il y en a une). La moyenne donne une indication sur la valeur moyenne du dépointé. L'écart-type permet de déduire la dispersion autour de la valeur moyenne. Cela permet de décrire de manière plus
- 30 précise l'instabilité sur la position du faisceau laser. En effet, il est plus facile de maîtriser un faisceau laser ayant une même moyenne de dépointé qu'un autre mais

ayant un écart-type plus faible. La période quant à elle permet de pouvoir faire la corrélation avec un phénomène extérieure (par exemple les cycles de la climatisation).

La figure 8 est une mesure (évolution) de dépointé à basse puissance. Le temps T (heures) de fonctionnement est en abscisse et le dépointé S en ordonnées ( $\mu\text{m}$ ). La courbe 65 est le dépointé en x et la courbe 66 le dépointé en y. Il est possible d'observer plusieurs phénomènes sur la figure 8. Il y a une période transitoire où le dépointé est constamment décroissant puis se stabilise environ 2h après. La moyenne du dépointé pour la période complète (environ 4h20) est de -2.1 $\mu\text{m}$  en x et -3.3 $\mu\text{m}$  en y avec des écart-types de 0.7 $\mu\text{m}$  et 0.9 $\mu\text{m}$  respectivement. Tandis que pour la période où le dépointé s'est stabilisé (après 2h de fonctionnement), la moyenne est de -2.5 $\mu\text{m}$  en x et -3.5 $\mu\text{m}$  en y mais avec des écart-types de 0.31 $\mu\text{m}$  et 0.34 $\mu\text{m}$  respectivement.

La figure 9 est une mesure de dépointé à haute puissance en mode impulsion unique. Le temps T (heures) de fonctionnement est en abscisse et le dépointé S en ordonnées ( $\mu\text{m}$ ). La courbe 65 (sombre) est le dépointé en x et la courbe 66 le dépointé en y. La moyenne du dépointé pour la période complète (environ 8h30) est de -2.1 $\mu\text{m}$  en x et -2.5 $\mu\text{m}$  en y avec des écart-types de 2.1 $\mu\text{m}$  et 2.5 $\mu\text{m}$  respectivement. Les valeurs de dépointé semblent donc similaires à la mesure précédente à faible puissance pour les valeurs moyennes mais en ce qui concerne les écart-types, ceux-ci sont sept à huit fois plus élevés, ce qui donne une indication sur le manque de stabilité du faisceau et donc de l'instabilité en mode impulsion unique.

La figure 10 est une mesure de dépointé à haute puissance en mode rafale (2 impulsions par rafale, 8W). Le temps T (heures) de fonctionnement est en abscisse et le dépointé S en ordonnées ( $\mu\text{m}$ ). La courbe 65 est le dépointé en x et la courbe 66 le dépointé en y. La moyenne du dépointé pour la période complète est de 1.3 $\mu\text{m}$  en x et 0.5 $\mu\text{m}$  en y avec des écart-types de 0.64 $\mu\text{m}$  et 0.7 $\mu\text{m}$  respectivement. Les valeurs de dépointé sont donc inférieures aux mesures précédentes à faible puissance ainsi qu'en mode impulsion unique à haute puissance pour les valeurs moyennes. Cependant, les écart-types sont trois à

quatre fois plus faibles que pour la mesure en mode impulsion unique à puissance moyenne équivalente. Ce mode rafale permet donc de réduire l'instabilité. En effet, le fait d'avoir un faisceau laser plus stable en termes de dépointé permet travailler de manière plus précise, et donc moins de pièces traitées défectueuses.

5            Au vu des valeurs récoltées lors de ces prises de mesures plusieurs constats peuvent être faits. A puissance moyenne égale (8W), il est avantageux d'utiliser le mode rafale pour réduire de manière considérable les effets de dépointés et réduire la dispersion de ces valeurs (environ trois fois moindre en mode rafale au lieu du mode impulsion unique) ce qui permet d'avoir des conditions de travail beaucoup plus stables – par exemple lorsque l'on cherche à traiter une pièce, tel que  
10            notamment l'usinage.

              Le mode impulsion unique du laser permet d'obtenir des énergies par impulsions beaucoup plus élevées (par exemple environ 80 $\mu$ J en mode impulsion unique contre 30 $\mu$ J en rafale avec deux impulsions). Cela permet d'atteindre des  
15            fluences plus importantes dans une mise en œuvre pratique du procédé, par exemple pour le traitement d'une pièce (par exemple par l'usinage) et donc de meilleur taux d'ablation. Cependant, en mode impulsion unique, de nombreux effets néfastes apparaissent tels que le phénomène de variation de focalisation ainsi que la modification de la taille de spot en fonction de la puissance. Pour résoudre le  
20            problème de variation de focalisation en mode impulsion unique, des réglages seraient à appliquer pour défocaliser d'une hauteur z (qui serait égale à la différence de hauteur entre le plan focal théorique et la distance qui peut être relevée expérimentalement selon une manière précédemment décrite) – ce qui est compliqué et incertain. De plus, le faisceau est moins stable en mode impulsion  
25            unique (voir écart-type dépointé). Ainsi, le procédé de l'invention contrôle le point de focalisation en imposant le mode rafale à la source laser et évite de tels réglages. Le procédé de contrôle est plus simple. Le procédé de l'invention permet de réduire le phénomène de variation de focalisation (beaucoup moins de variation de focalisation à énergie par impulsion équivalente) et il n'est donc plus nécessaire de  
30            défocaliser. De plus, la modification de la taille de point laser en fonction de la puissance est moins sensible en mode rafale qu'en mode impulsion unique ce qui

a l'avantage de pouvoir généraliser les trajectoires, peu importe la puissance nécessaire. Enfin, le faisceau laser est beaucoup plus stable (deux à trois fois) en termes de dépointé. Le procédé permet d'augmenter la répétabilité et la qualité de traitement de pièce, lorsque le procédé de l'invention est par exemple appliqué à

5 des traitements (comme l'usinage) de pièces.

La figure 11 illustre un exemple de dispositif 10 permettant la mise en œuvre du procédé de contrôle du point de focalisation d'un faisceau laser. Plus particulièrement, le dispositif 10 est un exemple de dispositif de contrôle du point de focalisation d'une source laser. Le dispositif 10 peut comprendre une source

10 laser 12 qui émet un faisceau laser 14. Le dispositif 10 peut comprendre un chemin optique 18 qui réalise la mise en forme du faisceau laser 14. Le chemin optique 18 peut comprendre différents éléments optiques, par exemple au moins un parmi un miroir, une lentille, un collimateur/dilatateur de faisceau (« beam expander »), un atténuateur, un polariseur, etc. Le chemin optique 18 peut envoyer le faisceau laser

15 14 selon sa direction de propagation principale vers une tête scanner 20. La tête scanner 20 comprend par exemple des miroirs inclinables, une lentille oculaire. Il peut s'agir d'une tête scanner galvanométrique.

Le procédé de contrôle peut en outre comprendre le traitement d'une pièce 16 par le faisceau laser 14, le point de focalisation étant contrôlé en imposant le

20 mode rafale à la source laser. Un tel procédé permet une meilleure stabilité et maîtrise du faisceau laser durant le traitement de la pièce et ainsi un traitement de meilleure qualité. En outre, les effets thermiques sont mieux maîtrisés, ce qui contribue à améliorer le traitement de la pièce.

Les formules suivantes montrent l'importance du contrôle du point de

25 focalisation par mode rafale lors d'un traitement de pièce, selon les manières précitées. La formule suivante est la formule d'évolution d'un diamètre d'impact laser (c'est-à-dire les dimensions du résultat du traitement de la pièce) en fonction de la taille du point laser, avec  $\omega_0$  qui est le rayon du point laser :

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln \left( \frac{F_p}{F_{th}} \right)$$

F est la fluence appliquée,  $F_{th}$  est une fluence seuil pour l'ablation. Si la taille du point laser change (ici le  $\omega_0$ ), alors par voie de conséquence, le diamètre d'impact sur la pièce va changer. Ceci est sous contrôle dans le cadre de l'invention.

La formule suivante est la formule de calcul de la fluence sur la pièce (la fluence étant la densité d'énergie) :

$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega^2_0}$$

$E_p$  est l'énergie appliquée par impulsion. Si la taille ( $\omega_0$ ) du point de laser change, on a une variation de la valeur de la fluence qui est appliquée. Cette variation de fluence entraîne une variation sur les dimensions de l'usinage (et plus généralement, du traitement de la pièce), en particulier la profondeur – comme l'illustre la formule suivante :

$$z = \delta \ln \frac{F}{F_{th}}$$

où F est la fluence appliquée,  $F_{th}$  est une fluence seuil pour l'ablation et  $\delta$  est relatif à une profondeur de pénétration du faisceau laser d'usinage dans le matériau. Le contrôle de la taille du point laser selon l'invention permet donc de contrôler la profondeur de traitement.

Une variation non contrôlée de la taille de point laser entraîne deux variations : la variation de la fluence appliquée sur la pièce, ce qui entraîne donc au minimum la variation non contrôlée de la profondeur, et la variation des dimensions du résultat du traitement de la pièce (tel que l'usinage). Le procédé de l'invention permet d'éviter cela.

Une variation non contrôlée selon la direction Z induit une variation de position du point de focalisation, ce qui oblige à repositionner la pièce pour repositionner le point de focalisation sur la pièce – ce qui rend tout traitement de pièce compliqué, lent et peu qualitatif. Un traitement de pièce est souvent composé de plusieurs étapes avec des puissances différentes ; cela signifie qu'il faudrait faire ce repositionnement entre chaque étape, ce qui augmenterait le temps total de traitement, et réduirait donc ainsi la productivité. Le procédé de l'invention permet d'éviter cela.

Une variation non contrôlée du faisceau laser dans un plan transversal à la direction de propagation du faisceau laser rend imprécis le traitement de pièce. Les précisions requises dans le micro-usinage sont de l'ordre de quelques micromètres, allant de  $0.1\mu\text{m}$  à au moins  $100\mu\text{m}$ , de préférence de  $1\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$ . Le dépointé 5 étant environ trois fois moins important en mode rafale qu'en mode impulsion unique, il en résulte des usinages dont la « dispersion » (c'est-à-dire l'amplitude) des dimensions est 1,5 fois moins étendue en mode rafale (on passe de  $11\mu\text{m}$  en mode impulsion unique, à  $8\mu\text{m}$  en mode rafale), ou encore la dispersion est 30% moindre en mode rafale par rapport au impulsion unique, ou encore la dispersion 10 est 50% plus étendue en impulsion unique par rapport au mode rafale.

Sur la figure 11, la tête scanner 20 est apte à diriger le faisceau 14 vers la pièce 16. Le dispositif 10 comprend également des organes de mise en mouvement de la pièce. Par exemple, le dispositif peut comprendre des organes permettent par exemple le déplacement de la pièce 16 selon une direction X, une direction Y, un 15 plan XY (les directions X et Y et le plan XY étant transversaux à une direction Z de propagation du laser) ou bien permettent la rotation de la pièce 16, par exemple autour de l'une des directions précitées, par exemple autour de la direction Y (une broche par exemple). Dans une réalisation de l'invention, un poste de contrôle 22, qui peut être une tablette, contrôle la source laser 12, le chemin optique 18, la tête 20 scanner 20 et les organes de changement de position de la pièce 16.

Le mode rafale permet de délivrer une dose d'énergie élevée à un endroit défini pour provoquer un traitement d'une pièce sans provoquer de déformation de la pièce. La même dose d'énergie est délivrée en mode rafale qu'avec un mode à 25 impulsion unique, mais répartie sur plusieurs impulsions. Étant donné que la même quantité d'énergie est délivrée en au moins deux impulsions, l'énergie délivrée par la première impulsion est stockée dans la pièce à traiter et une densité d'énergie relativement faible est ensuite nécessaire pour la deuxième impulsion sur la pièce et ainsi de suite. Ceci évite des déformations de la pièce 16 pendant le traitement. Le procédé de l'invention n'induit pas de chauffage de la pièce 16 pendant le 30 traitement. Le train 24 d'impulsions est capable de traiter la pièce 16 parce que l'énergie est délivrée avec une dose qui est proche du seuil d'ablation de la pièce.

Le seuil d'ablation est l'énergie nécessaire pour enlever de la matière par surface. Selon l'invention, on évite de changer la position du point de focalisation et donc on évite le changement de la taille du faisceau dans la direction Z. On évite d'affecter à son tour la zone de chauffage, la taille et la forme du traitement de de la pièce.

5 Le traitement de la pièce peut par exemple être une structuration d'une surface la pièce. La structuration d'une surface permet de donner une fonctionnalité à une surface. Par exemple, il peut s'agir d'une modification d'un état de surface de la pièce, il peut s'agir d'une gravure. Le traitement de la pièce peut aussi être un usinage de la pièce. L'usinage de la pièce permet un retrait d'un grand volume de  
10 matière. L'usinage permet de donner une forme à une pièce. Il peut s'agit de découpe ou de perçage, etc. L'usinage de la pièce peut être opéré sur une pièce à plat ou en tournage.

Le traitement de la pièce dans le cadre du procédé selon l'invention est réalisé uniquement en mode rafale – avec les caractéristiques et avantages précités. Le  
15 procédé peut comprendre une étape d'ébauche de la pièce et une étape de finition. L'étape d'ébauche peut être réalisée en imposant le mode rafale. Alternativement, l'étape d'ébauche peut être réalisé en imposant le mode impulsion unique. En effet, lors de l'étape d'ébauche, le but est d'enlever le maximum de matière en un minimum de temps - sans nécessairement avoir besoin d'une précision parfaite  
20 (mode ébauche). L'étape de finition est réalisée en imposant le mode rafale. Pour l'étape de finition, le taux d'ablation est moins important que l'état de surface de la pièce dont des tolérances dimensionnelles strictes sont à atteindre. L'avantage du mode rafale est que le contrôle du point de focalisation permet de stabiliser le faisceau et d'obtenir un usinage répétable de grande qualité. En mode rafale, le  
25 point de focalisation et la taille du point laser sont sous-contrôle, ainsi que le dépointé.

L'avantage de réaliser le traitement de la pièce avec une étape de finition en imposant un mode rafale et en réalisant au préalable une passe d'ébauche en mode impulsion unique est le gain de temps pour produire les pièces. On peut  
30 gagner jusque 40% de temps, tout en assurant la qualité aux pièces.

Durant l'usinage à plat, le faisceau laser en mode rafale peut être à 2 ou 3 impulsions par ensemble 26 d'impulsions, ou plus d'impulsions. L'intervalle 32 entre les impulsions peut être à plus ou moins de 1ns.

Durant le traitement de la pièce par un usinage par tournage, la pièce est  
5 entraînée en rotation autour d'une direction, telle que la direction X par exemple. Pour cela, le faisceau laser 14 est dirigé selon la direction Z vers la pièce 16 entraînée en rotation avec un vitesse  $\omega$ .

Se pose la question de l'influence de l'angle d'incidence entre le faisceau laser 14 et la surface de la pièce 16 ainsi que le taux d'ablation. Le but est d'usiner la  
10 surface de la pièce 16 avec l'angle d'incidence  $\alpha$  optimal afin d'obtenir les meilleurs taux d'ablation au cours de l'usinage et donc de diminuer le temps de travail. La figure 12 montre un schéma de principe pour déterminer l'angle d'incidence  $\alpha$  du faisceau laser sur une pièce 16 en rotation. En tournage, le faisceau laser est généralement orienté perpendiculairement à l'axe de rotation et tangentiellement à  
15 la pièce à usiner. Une couche de matière circonférentielle selon le faisceau laser 34 est par exemple usinée avec un certain décalage  $x$  (ou « offset », le long de la direction Y) connu du centre de rotation de la pièce 16 (qui peut être sous forme de barreau). Ceci est répété un certain nombre de fois et une mesure est effectuée régulièrement, par exemple toutes les 5 ou 10 passes. En fonction du diamètre de  
20 la pièce 16 sous forme de barreau, il est possible de déterminer l'angle d'incidence  $\alpha$ .

Le décalage  $x$  appliqué est une valeur connue ( $x$  sur la figure 12), et le diamètre ( $D$ ) est mesuré par un système de mesure des dimensions de la pièce. L'angle d'incidence peut-être déterminé grâce à :

25 
$$\sin \alpha_i = \frac{x}{\frac{D}{2}}$$

(équation 1)

Comme le diamètre de la pièce 16 est de plus en plus petit au fur et à mesure des usinages, l'angle est de plus en plus grand jusqu'à devenir tangent au barreau.

Le volume  $V$  usiné sur la figure 12 correspond à une couronne sur le pourtour  
30 de la pièce, peut être calculé grâce à :

- 22 -

$$V = \left( \frac{\pi * d_i^2}{4} - \frac{\pi * d_{i+1}^2}{4} \right) * l$$

(équation 2), où :

$d_i$  = Diamètre avant usinage

$d_{i+1}$  = Diamètre après usinage

5  $l$  = Longueur de la ligne d'usinage

Il est donc possible d'étudier le volume ablaté en fonction de l'angle d'incidence (entre le faisceau laser et la surface de la pièce – ou en d'autres termes, entre le faisceau laser et une normale à une portion de surface) et donc déduire l'angle optimal donnant le meilleur taux d'ablation. Comme chaque mesure est faite  
10 après un certain nombre de passes qui est constant avec des paramètres lasers identiques, le volume ablaté est l'image du taux d'ablation.

La figure 13 est une représentation de l'évolution du diamètre en fonction du nombre de passes d'usinages. Le diamètre  $D$  ( $\mu\text{m}$ ) est en ordonnées et le nombre de passes  $N$  d'usinage en abscisses. Sur la figure 13, deux paliers peuvent être  
15 observés sur les courbes : Le premier en dessous de 200 passes et le second au-dessus de 5600 passes (saturation de l'usinage). L'angle optimal se situe là où la courbe est la plus raide (donc environ 5000 passes). En effet, comme le volume ablaté sera maximal, la réduction de diamètre se fera le plus rapidement.

La figure 14 montre l'évolution du volume ablaté pour 200 passes d'usinage  
20 en fonction de l'angle d'incidence du laser sur la surface. La figure 14 représente l'évolution du volume ablaté en fonction de l'angle d'incidence pour des conditions identiques. Le volume  $V$  ablaté pour 200 passes d'usinage [ $\text{mm}^3$ ] est en ordonnées et l'angle d'incidence ( $^\circ$ ) en abscisses. Il est possible de déterminer une plage de valeurs pour l'angle optimal en prenant l'angle pour lequel la densité de points est  
25 la plus faible (pour des conditions données, ici à énergie et taille de point fixées). Ainsi, l'angle optimal est compris entre  $0$  et  $90^\circ$ , de préférence est compris entre  $50^\circ$  et  $85^\circ$ , de préférence compris entre  $65^\circ$  et  $80^\circ$ .

L'application de l'angle optimal est valable pour le traitement de la pièce, par structuration, usinage ou autres. L'application de l'angle optimal est valable pour  
30 des traitements ayant des étapes de type ébauche et finition ou un seul type

d'étape. L'angle optimal est particulièrement approprié pour des étapes type ébauche, pour le retrait du plus de matière possible rapidement, avec le meilleur taux d'ablation.

Il est à noter que les développements précédents sur l'angle optimal s'appliquent à un procédé de traitement d'une pièce indépendamment du contrôle d'un point de focalisation et indépendamment du mode rafale. Ceci s'applique par exemple aussi au mode impulsion unique.

Afin d'usiner la matière de la façon la plus efficace possible, il est avantageux d'avoir un angle d'incidence proche de l'angle optimale. Grâce à l'**Error! Reference source not found.** il est possible de déterminer quel sera le « nouveau diamètre » après un certain nombre de passes. Ceci permet de changer la trajectoire afin de d'attaquer la pièce avec un angle d'incidence proche de l'optimum au fur et à mesure de l'usinage.

$$d_{i+1} = \sqrt{d_i^2 - 4 * \frac{V}{\pi * l}}$$

15 (équation 3)

L'équation 3 montre la relation entre le diamètre obtenu après usinage et le volume initial et le volume ablaté. Comme l'équation 3 permet de déterminer le diamètre après usinage, il est possible de calculer la position du laser afin d'être à l'angle d'incidence optimale (entre 50 et 80°) via :

20 
$$x = \frac{d_{i+1}}{2} \sin \alpha_{optimal}$$

(équation 4)

L'équation 4 montre la détermination de la position du laser pour être à l'angle optimal.

Lors du traitement d'une pièce avec le faisceau laser (tel qu'un usinage), des fréquences (ou vitesses) de travail sont déterminées pour obtenir une bonne qualité de la pièce. Ceci permet de limiter des effets hélicoïdaux ou effets de méplats sur la pièce, afin d'obtenir une pièce lisse. Un ratio de ces fréquences peut en particulier être déterminé dans ce but. Une géométrie est usinée sur la pièce de manière répétitive par le faisceau laser selon une fréquence de répétition de suivi d'une

géométrie – la géométrie correspondant à une forme, un contour de la pièce que l'on suit à répétition pour obtenir la pièce finale. Également, le faisceau laser est appliqué de manière répétitive sur la pièce, puis revient à sa position initiale, selon une fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce. Un ratio

5 entre la fréquence de répétition de suivi d'une géométrie et la fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce est déterminé de sorte à obtenir une pièce de bonne qualité en limitant, voire en supprimant, les effets indésirables tels que ceux mentionnés ci-dessus.

Par exemple, lors du traitement d'une pièce par un usinage par tournage, la

10 pièce est entraînée dans un mouvement de rotation. De manière répétée, on expose une géométrie de la pièce (telle qu'une bande le long de la pièce) au faisceau laser, ce qui correspond à la fréquence de répétition de suivi d'une géométrie. Ceci correspond à la fréquence de rotation de la pièce. En outre, le faisceau laser est appliqué de manière répétitive sur la pièce (le long de la pièce)

15 puis revient à sa position initiale, ce qui correspond à la fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce. Le ratio entre ces fréquences est déterminé de sorte à avoir une répartition maîtrisée des trajectoires du faisceau laser par rapport à la pièce.

Par exemple encore, lors du traitement d'une pièce du type un usinage à plat

20 d'une pièce, un mouvement relatif entre le faisceau laser et la pièce se produit. Le faisceau laser et/ou la pièce sont entraînés en mouvement. De manière répétée, on expose une géométrie de la pièce (telle qu'un contour) au faisceau laser, ce qui correspond à la fréquence de répétition de suivi d'une géométrie. Ceci correspond à la fréquence de mouvement relatif entre la pièce et le faisceau laser. En outre le

25 faisceau laser est appliqué de manière répétitive sur la pièce et peut avoir un mouvement de précession. Le mouvement de précession est un mouvement de rotation tel celui d'une toupie. Le mouvement de précession peut se produire pour un faisceau laser en rotation, dont l'axe de rotation change d'orientation. Un tel mouvement est désirable lorsque l'on cherche à obtenir des bords usinés de pièce

30 qui sont perpendiculaires à la surface de la pièce. Le document WO2017029210 décrit un tel mouvement de précession. Dans le mouvement de précession, le

faisceau laser a un mouvement de rotation autour d'une normale à la surface à usiner, avec un angle non nul entre le faisceau laser et la normale. La fréquence de ce mouvement de rotation correspond à la fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce. Le ratio entre ces fréquences est déterminé de sorte à avoir une répartition maîtrisée des trajectoires du faisceau laser par rapport à la pièce.

Les ratios mentionnés peuvent être un nombre rationnel. Le faisceau laser passe alors de manière répétitive sur les mêmes sections de la pièce. Un ratio rationnel permet de contrôler précisément la périodicité du traitement (de l'usinage), et donc de générer des motifs périodiques, ceci sans synchronisation.

Les ratios sont de préférence un nombre irrationnel (c'est-à-dire qu'ils s'écrivent avec un nombre infini de décimales sans suite logique) – voire, un nombre le plus irrationnel possible. Ceci permet d'éviter que le laser usine systématiquement sur les mêmes sections de la pièce. Ceci permet un schéma aperiodique, irrégulier de traitement (d'usinage) de la pièce. Ceci évite un schéma périodique de traitement (d'usinage) de la pièce. Le profil ou contour que l'on cherche à obtenir ne comporte pas de méplats ou d'effets hélicoïdaux. La qualité de la pièce obtenue est améliorée et le nombre de pièces défectueuses est réduit – voire nul. Par exemple, le nombre pi, la racine carrée de 2 ou le nombre d'or (valant  $(1+\sqrt{5})/2$ ), ou l'inverse du nombre pi, de la racine carrée de 2 ou du nombre d'or, peut être choisi comme ratio (éventuellement modulo un entier). Ce ratio permet donc de pouvoir limiter le nombre de passes tout en éliminant au plus vite l'aspect méplat ou hélicoïdal de la pièce. En particulier, le ratio équivalent au nombre d'or modulo un entier ( $0,618\dots + k$ , avec  $k \in \mathbb{N}$ ) permet d'assurer d'avoir le nombre minimal de passes du faisceau laser pour éviter d'avoir la formation d'un motif périodique, ceci sans synchronisation.

Le ratio sous forme de nombre irrationnel permet de s'affranchir d'une synchronisation entre le faisceau les organes de mise en mouvement de la pièce (tels qu'une broche). Un ratio irrationnel (le nombre d'or étant « très » irrationnel) permet d'avoir un nombre optimal (voire, minimal) de passes du faisceau laser pour

éviter l'apparition d'un motif périodique sur la pièce. Un ratio irrationnel permet de réaliser des motifs périodiques sans synchronisation matérielle.

La figure 15 montre un usinage à plat d'une pièce 16. Le faisceau laser est selon la direction Z. Une géométrie circulaire de pièce 16 est représentée à titre d'exemple. Le faisceau laser suit la géométrie, selon une fréquence de répétition de suivi d'une géométrie. En outre, le faisceau laser est appliqué avec un mouvement 36 de précession. Le mouvement 36 correspond à des « boucles » appliquées de manière répétée, selon la fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce. Le ratio de ces fréquences peut être rationnel, si des passes régulières aux mêmes endroits sont souhaitées. Le ratio de ces fréquences peut être de préférence irrationnel, si des passes irrégulières à différents endroits sont souhaitées. Avec un ratio irrationnel, plusieurs mouvements 36 sont représentés sur la figure 15 à chaque suivi de la géométrie, de sorte à ce que les mouvements 36 se chevauchent, soient contiguës ou disjoints, de sorte à lisser la pièce. Plus le ratio est irrationnel, plus les mouvements 36 sont irrégulièrement répartis et plus la pièce usinée est lisse.

La figure 16 montre un usinage par tournage de la pièce 16. Le faisceau laser est selon la direction Z. Une géométrie sous forme de bandes longitudinales est représentée à titre d'exemple. Le faisceau laser suit la géométrie selon une fréquence de répétition de suivi d'une géométrie. En outre, le faisceau laser est appliqué selon des mouvements 17 sur la pièce, de manière répétée, selon la fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce. Le ratio de ces fréquences peut être rationnel, si des passes régulières aux mêmes endroits sont souhaitées. Le ratio de ces fréquences peut être de préférence irrationnel, si des passes irrégulières à différents endroits sont souhaitées. Avec un ratio irrationnel, plusieurs mouvements 17 sont représentés sur la figure 16 à chaque suivi de la géométrie, de sorte à ce que les mouvements 17 se chevauchent, soient contiguës ou disjoints, de sorte à lisser la pièce. Plus le ratio est irrationnel, plus les mouvements 17 sont irrégulièrement répartis et plus la pièce usinée est lisse.

La figure 17 est une comparaison de l'écart (en  $\mu\text{m}$ ) de la cote nominale pour différents diamètres usinés en mode impulsion unique et en mode rafale. L'écart 0

en ordonnées est le diamètre cherché et les traits 38 sont l'écart maximum autorisé. Les sections 40, 42, 44 montrent la répartition des cotes en mode impulsion unique et les section 46, 48, 50 montrent la répartition des cotes en mode rafale, selon l'invention. On voit que les pièces obtenues selon le procédé de l'invention sont de  
5 meilleure qualité. On voit que le procédé selon l'invention est répétable.

Un avantage du procédé de contrôle selon l'invention est que l'on peut utiliser des laser haute puissance avec des composants standards (tels que des lentilles, des miroirs avec un revêtement standard, des optiques de transmission (tels qu'un cube polarisant), des organes séparateurs de faisceau (ou « beam splitter » tels  
10 que des lames quart-d'onde ou demi-onde).

Par ailleurs, on peut faire varier la puissance du laser durant le procédé. Un intérêt est que cela permet de faire varier un traitement appliqué à une pièce (les motifs, les caractéristiques des traitements de la pièce, telles que la profondeur d'ablation). L'avantage du mode rafale est que l'on peut modifier la puissance  
15 appliquée de manière contrôlée.

L'invention vise un procédé de contrôle d'un point de focalisation, qui peut en outre avoir une ou des étapes de traitement d'une pièce. L'invention peut aussi être un procédé de traitement d'une pièce, comprenant le contrôle d'un point de focalisation. L'invention permet de remplir les points de contact entre le laser et la  
20 pièce le plus vite possible, avec le moins de passe possible du laser sur la pièce – ce qui permet de gagner du temps.

L'invention permet de réduire les effets de bouclier de plasma dans l'air lorsque celui-ci est susceptible de se produire et qui est susceptible d'altérer le traitement de la pièce et la précision du traitement.

25 La présente invention a été décrite en relation avec des modes de réalisations spécifiques, qui ont une valeur purement illustrative et ne doivent pas être considérés comme limitatifs. D'une manière générale, il apparaîtra évident pour un homme du métier que la présente invention n'est pas limitée aux exemples illustrés et/ou décrits ci-dessus.

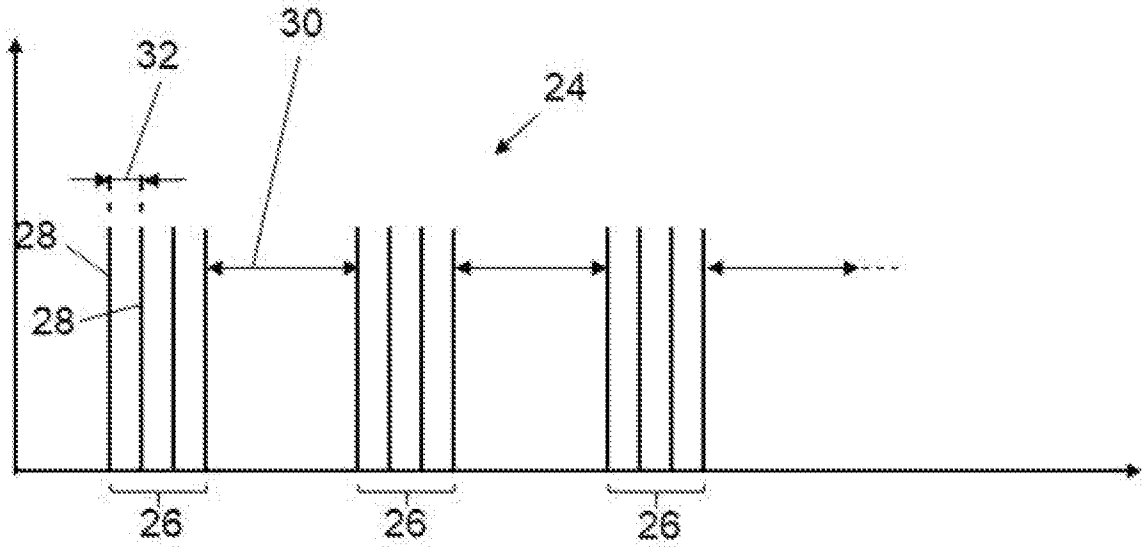
## Revendications

1. Procédé de contrôle d'un point de focalisation d'un faisceau laser émis par une source laser d'impulsions ultra-courtes de haute puissance, le procédé  
5 comprenant les étapes de
  - Fourniture d'une source laser (12) haute puissance ;
  - Activation de la source laser ;
  - Contrôle du point de focalisation du faisceau laser (14) en imposant un mode rafale à ladite source laser de sorte à générer un faisceau laser  
10 comprenant un train d'impulsions (24) comprenant des ensembles (26) d'impulsions laser, les ensembles d'impulsions étant répétées dans le temps.
  
2. Le procédé de contrôle selon la revendication 1, dans lequel le point de  
15 focalisation est contrôlé selon une direction (Z) de propagation du faisceau laser et/ou dans lequel le point de focalisation est contrôlé en contrôlant la taille du point de focalisation et/ou dans lequel le point de focalisation est contrôlé dans un plan transversal à une direction de propagation principale dudit faisceau laser.
  
- 20 3. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre, le réglage du point de focalisation du faisceau laser.
  
4. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications précédentes, dans  
25 lequel la source laser a une puissance supérieure à 2W de préférence supérieure à 20W.
  
5. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications précédentes, dans  
30 lequel la source laser a une puissance supérieure à 2W pour des longueurs d'onde dans l'ultraviolet, une puissance supérieure à 5W pour des longueurs

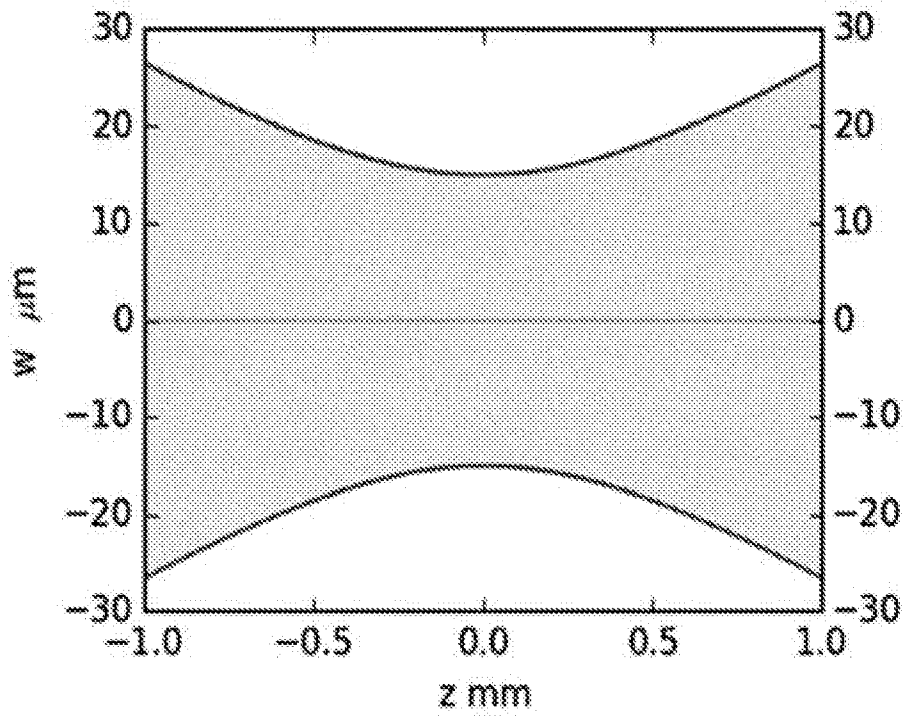
d'onde dans le visible, ou une puissance supérieure à 10W pour des longueurs d'onde dans l'infrarouge.

- 5 6. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les impulsions de la source laser ont une durée de 150fs à 10ps.
7. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications précédentes, comprenant une variation de la puissance avec le faisceau laser.
- 10 8. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications précédentes, dans lequel chacun des ensembles d'impulsions laser comprend une première impulsion et une seconde impulsion avec un intervalle de temps entre les impulsions compris entre 0,1ns et 100ns, de préférence entre 0,2ns et 20ns.
- 15 9. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les ensembles d'impulsions sont répétés dans le temps avec un intervalle de temps entre les ensembles d'impulsions compris entre 100ns et 1ms , de préférence entre 500ns et 20 $\mu$ s.
- 20 10. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre un traitement d'une pièce par le faisceau laser en imposant le mode rafale à la source laser.
- 25 11. Le procédé de contrôle selon la revendication précédente, dans lequel le traitement de la pièce est une structuration de la surface de la pièce ou un usinage de la pièce.
- 30 12. Le procédé de contrôle selon l'une des deux revendications précédentes, dans lequel le traitement de la pièce est un usinage réalisé sur une pièce à plat.

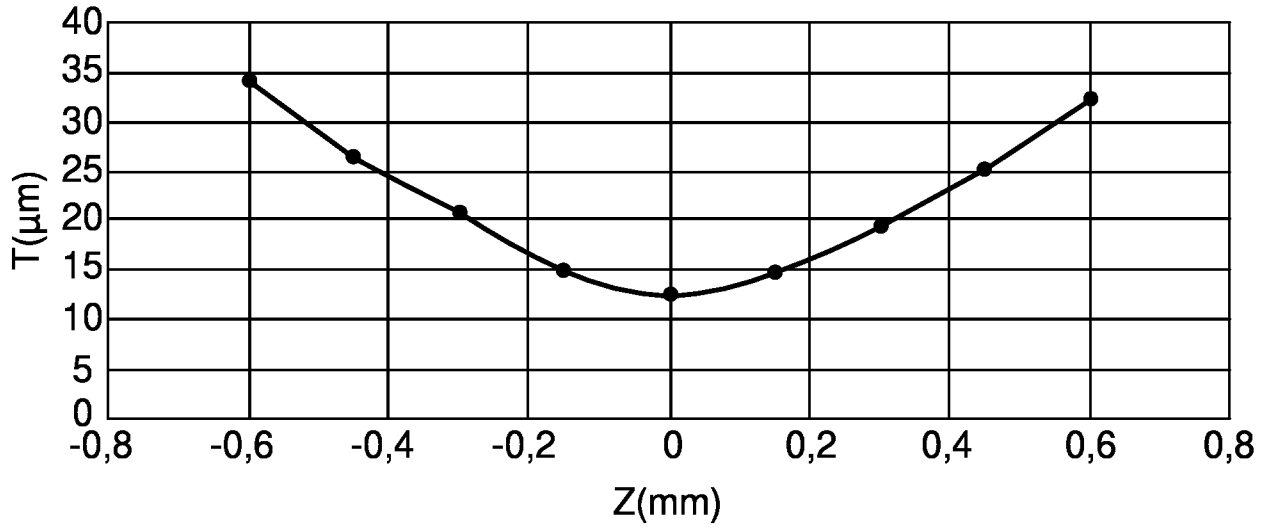
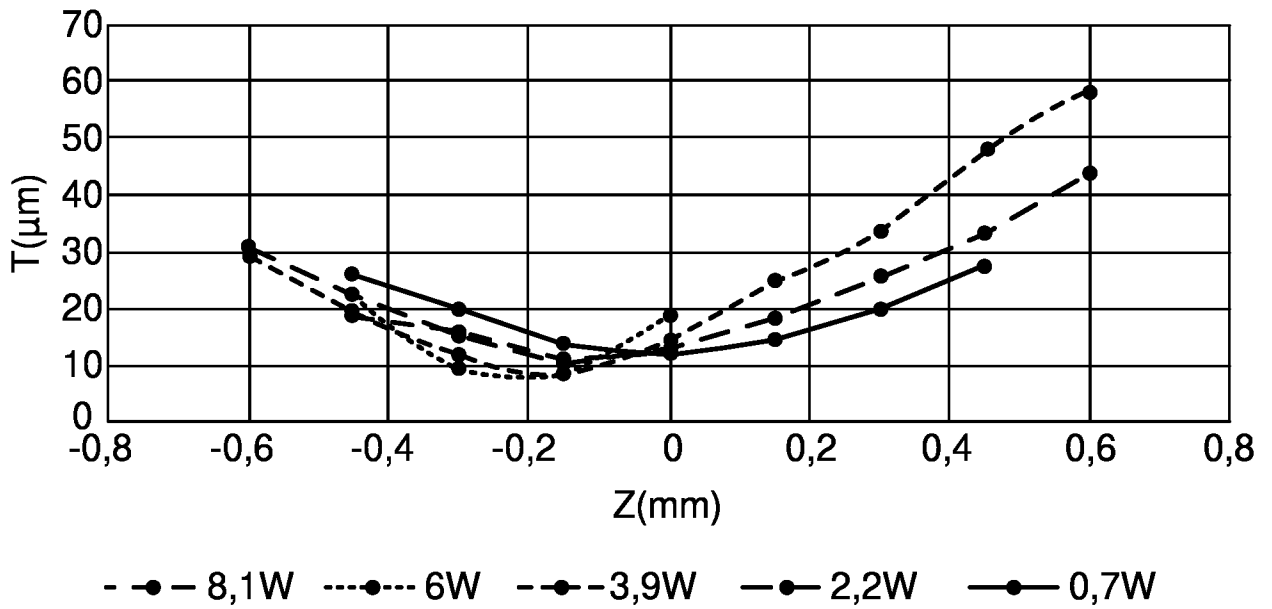
13. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications 9 ou 10, dans lequel le traitement de la pièce est un usinage réalisé par rotation.
- 5 14. Le procédé de contrôle selon la revendication précédente, dans lequel une pièce est entraînée en rotation et dans lequel l'angle d'incidence entre le faisceau laser et la surface de la pièce est compris entre 50° et 85°, de préférence compris entre 65° et 80°.
- 10 15. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications 10 à 14, dans lequel une géométrie est usinée sur la pièce de manière répétitive par le faisceau laser selon une fréquence de répétition de suivi d'une géométrie et dans lequel le faisceau laser est appliqué de manière répétitive sur la pièce selon une fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce, le ratio entre la fréquence de répétition de suivi d'une géométrie et la  
15 fréquence de répétition de l'application du faisceau laser sur la pièce est un nombre irrationnel.
- 20 16. Le procédé selon la revendication précédente, dans lequel le nombre irrationnel est le nombre pi, racine carrée de 2 ou le nombre d'or ou l'inverse de ces nombres, éventuellement modulo un entier.
- 25 17. Le procédé de contrôle selon l'une des revendications 10 à 16, dans lequel le traitement est fait selon une passe d'ébauche et une passe de finition, la passe de finition étant réalisé en imposant un mode rafale à la source laser.
18. Le procédé de contrôle selon la revendication précédente, dans lequel la passe d'ébauche est réalisée en imposant un mode impulsion unique à la source laser ou un mode rafale à la source laser.
- 30 19. Un dispositif (10) pour la mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications précédentes.

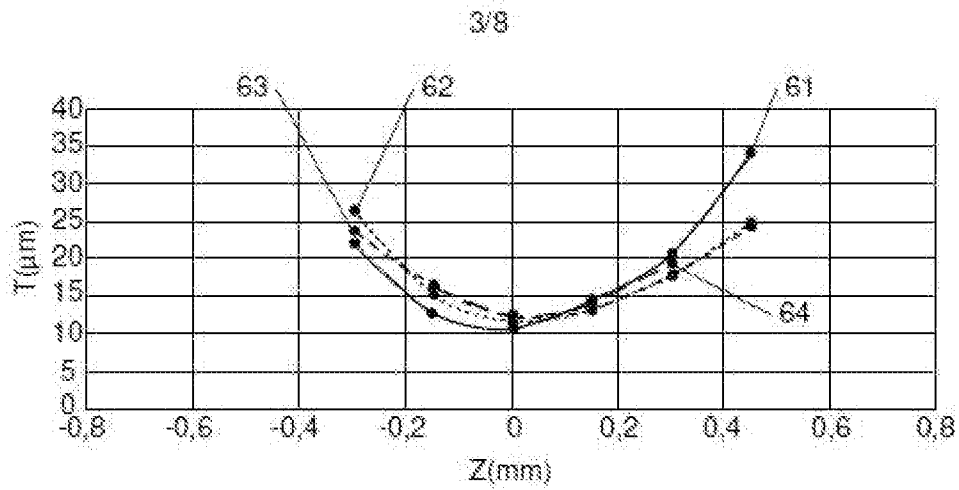


**Fig. 1**

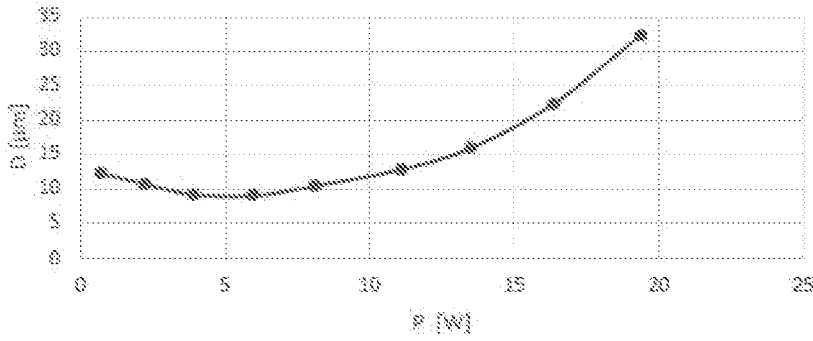


**Fig. 2**

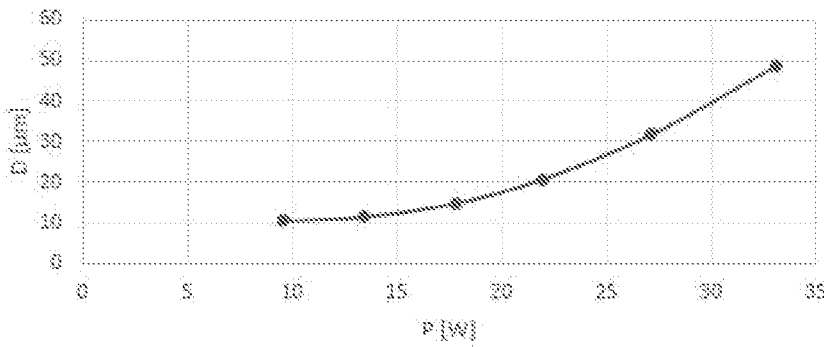
**Fig. 3****Fig. 4**



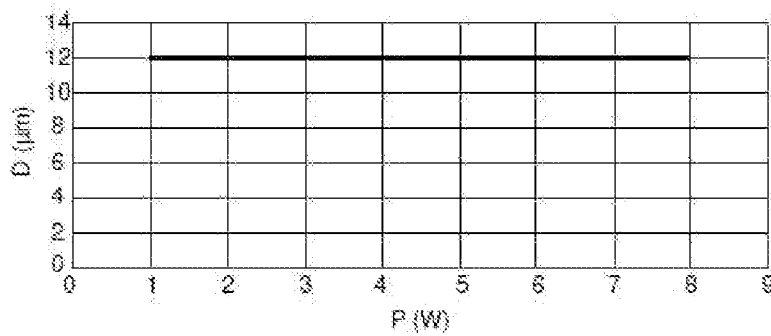
**Fig. 5**



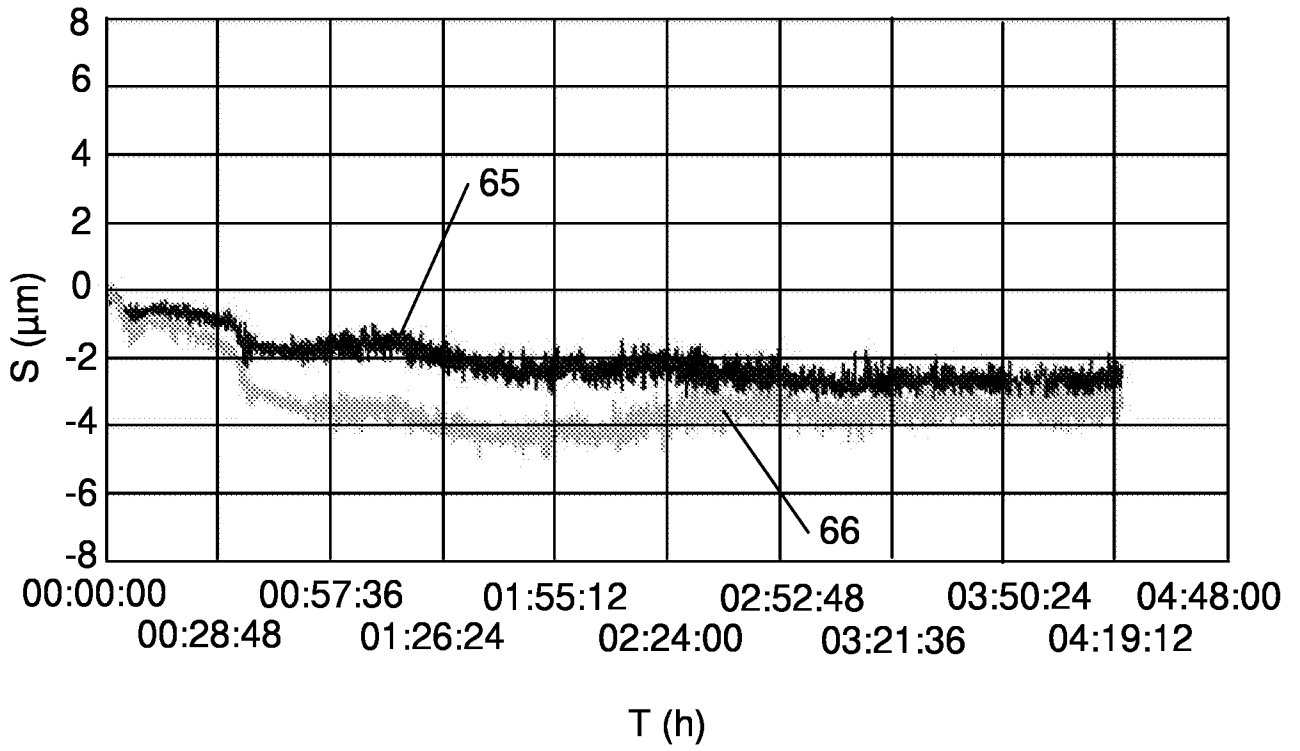
**Fig. 6a**



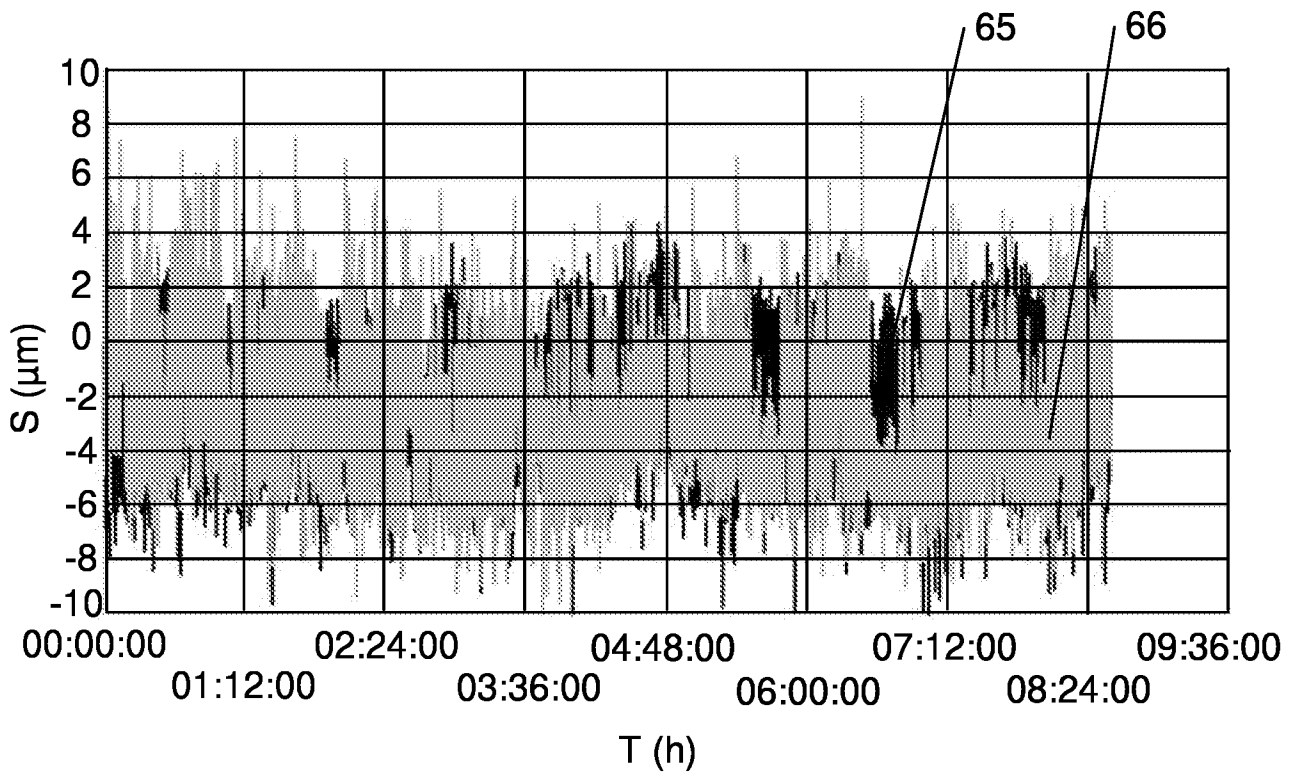
**Fig. 6b**



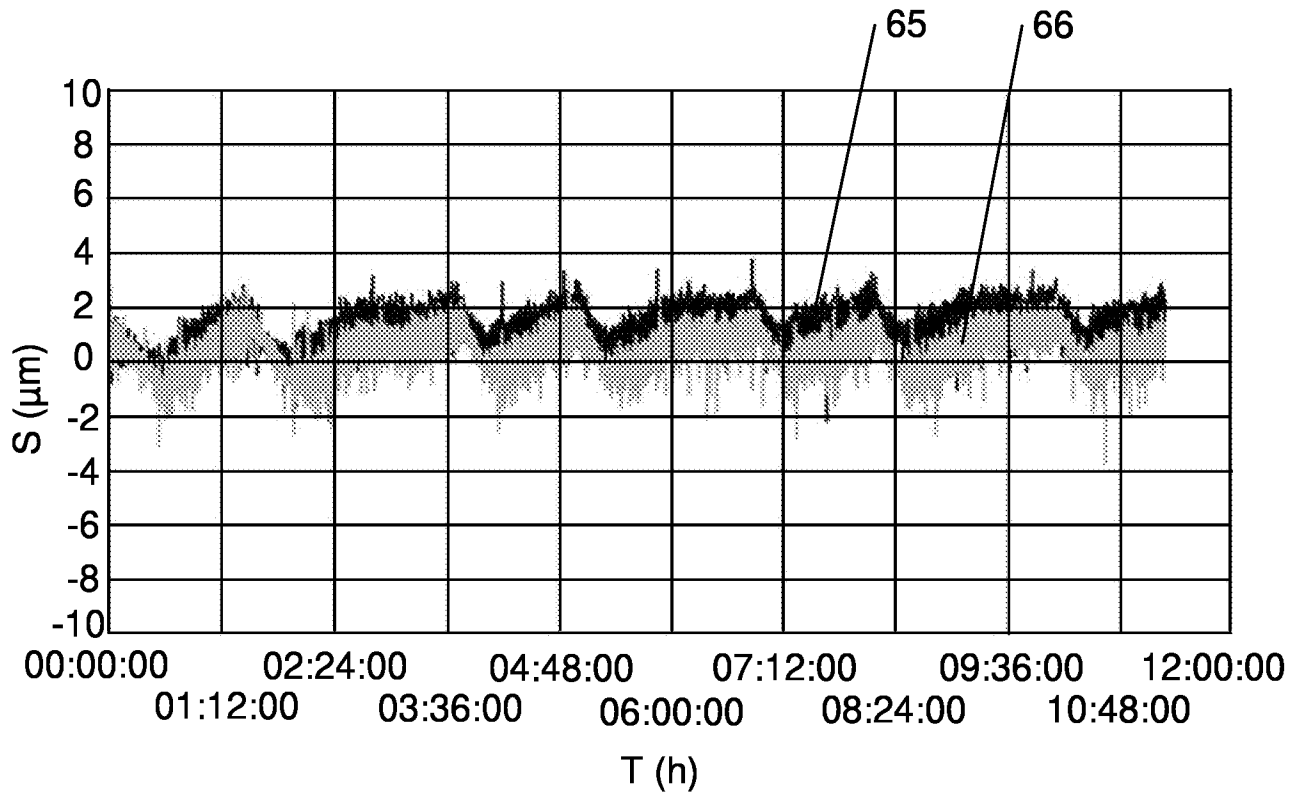
**Fig. 7**



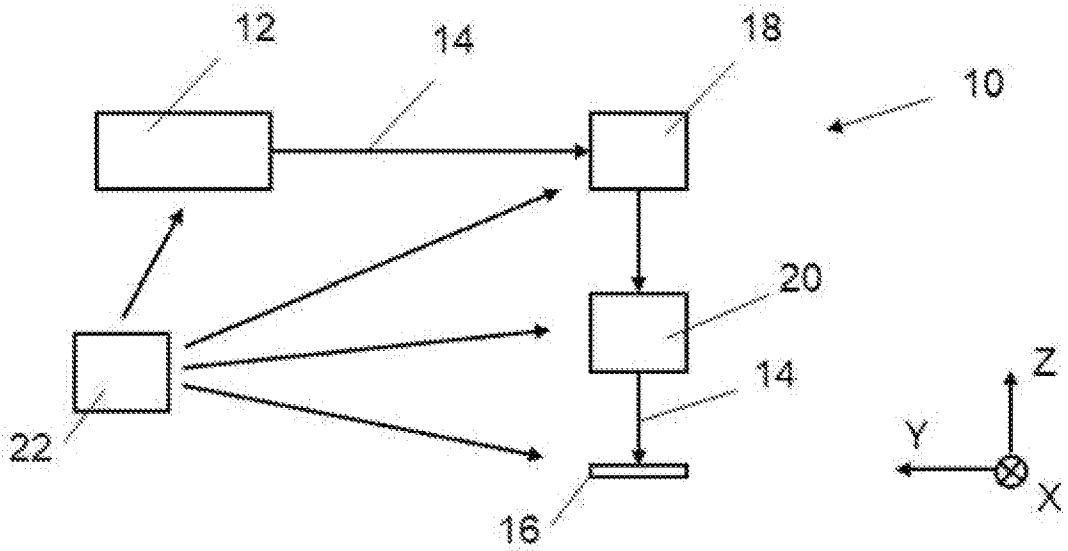
**Fig. 8**



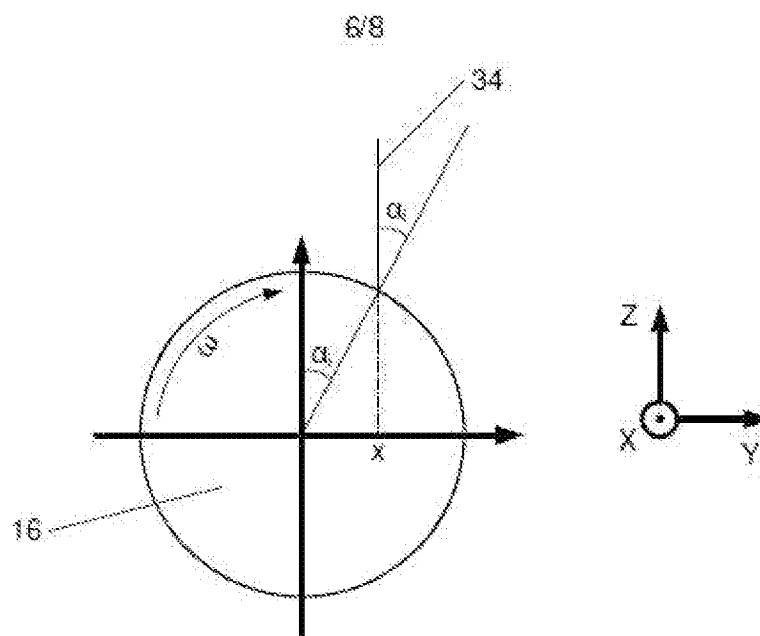
**Fig. 9**



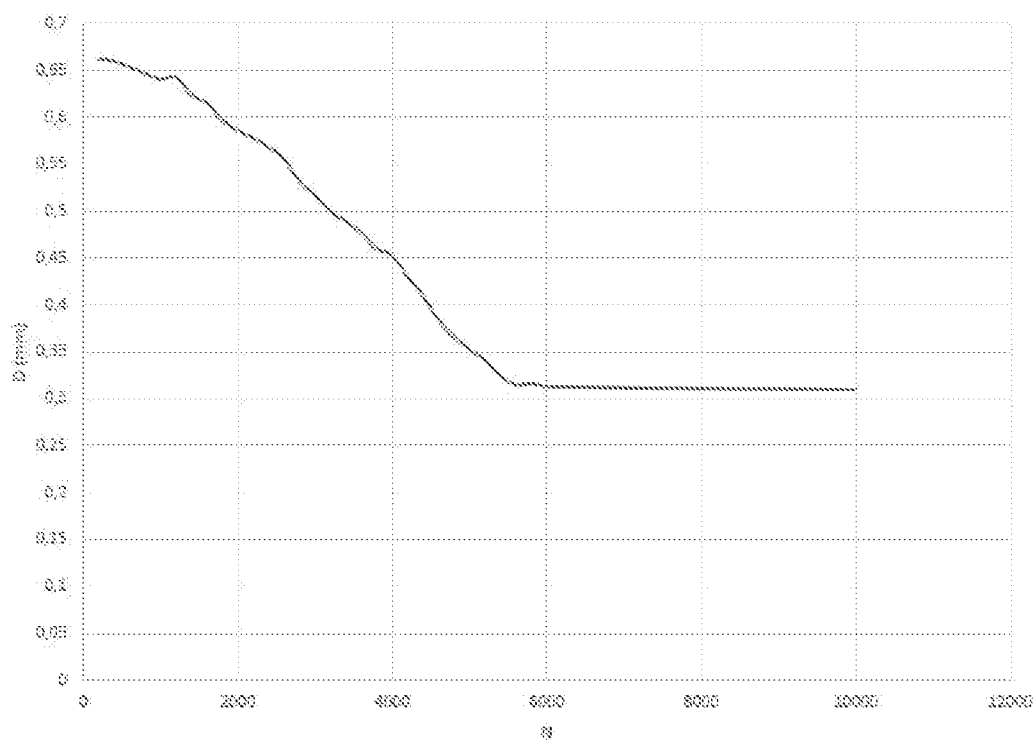
**Fig. 10**



**Fig. 11**

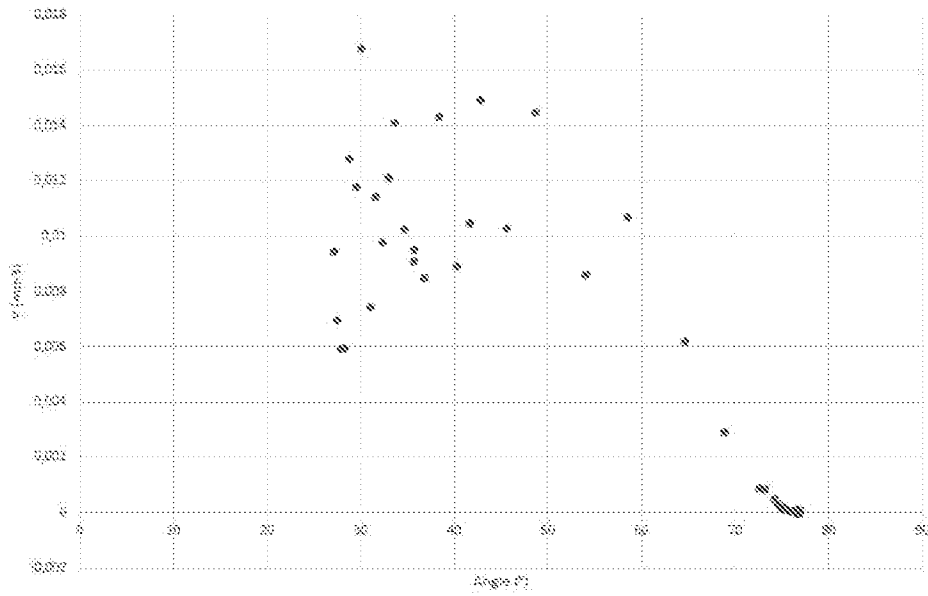


**Fig. 12**

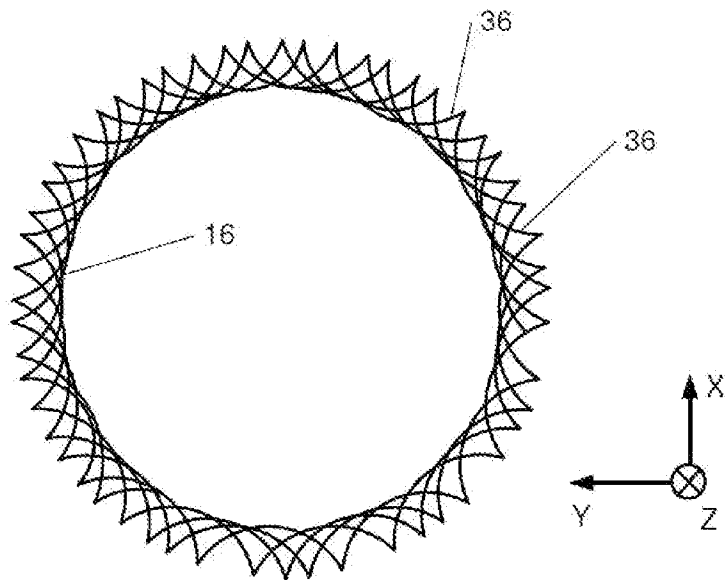


**Fig. 13**

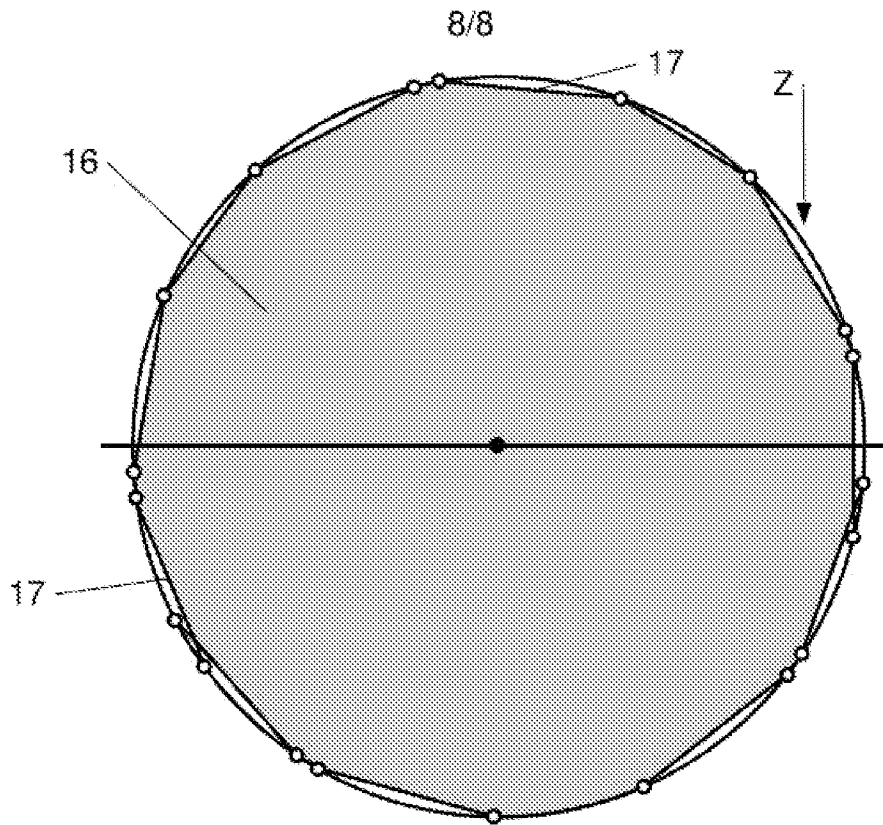
7/8



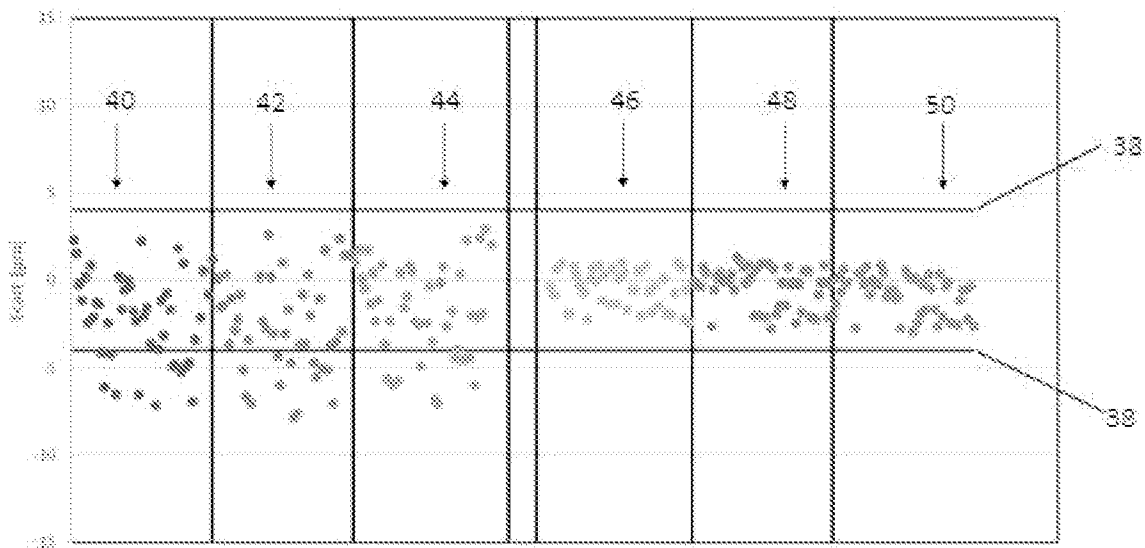
**Fig. 14**



**Fig. 15**



**Fig. 16**



**Fig. 17**

# TRAITE DE COOPERATION EN MATIERE DE BREVETS

## RAPPORT DE RECHERCHE DE TYPE INTERNATIONAL ÉTABLI EN VERTU DE L'ARTICLE XI.23., §10 DU CODE DE DROIT ÉCONOMIQUE BELGE

IDENTIFICATION DE LA DEMANDE INTERNATIONALE	REFERENCE DU DEPOSANT OU DU MANDATAIRE <b>PAT2616904BE00</b>
Demande nationale belge n° <b>202305869</b>	Date du dépôt <b>19-10-2023</b>
	Date de priorité revendiquée
Déposant (Nom) <b>LASER ENGINEERING APPLICATIONS</b>	
Date de la requête d'une recherche de type international <b>28-10-2023</b>	Numéro attribué par l'administration chargée de la recherche internationale à la requête d'une recherche de type international <b>SN85002</b>
<b>I. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE</b> (en cas de plusieurs symboles de la classification, les indiquer tous)	
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB <b>Voir rapport de recherche</b>	
<b>II. DOMAINES RECHERCHES</b>	
Documentation minimale consultée	
Système de classification	Symboles de la classification
<b>IPC</b>	<b>Voir rapport de recherche</b>
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents font partie des domaines consultés	
<b>III.</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>IL A ÉTÉ ESTIMÉ QUE CERTAINES REVENDECTIONS NE POUVAIENT FAIRE L'OBJET D'UNE RECHERCHE</b> (Observations sur la feuille supplémentaire)	
<b>IV.</b> <input type="checkbox"/> <b>ABSENCE D'UNITÉ DE L'INVENTION ET/OU CONSTATATION RELATIVE À L'ÉTENDUE DE LA RECHERCHE</b> (Observations sur la feuille supplémentaire)	

# RAPPORT DE RECHERCHE DE TYPE INTERNATIONAL

Demande de recherche No

**BE 202305869**

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE  
 INV. **B23K26/0622 B23K26/08 B23K26/70**  
 ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)  
**B23K**

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)  
**EPO- Internal**

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
	<p><b>RECHERCHE INCOMPLETE</b>  <b>voir feuille supplémentaire C</b>                      -----</p>	
A	<p><b>WO 2022/096443 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE])</b>  <b>12 mai 2022 (2022-05-12)</b>  <b>* revendications; figures *</b>                      -----</p>	<b>1 - 18</b>
A	<p><b>DE 10 2019 111501 A1 (PULSAR PHOTONICS GMBH [DE])</b>  <b>5 novembre 2020 (2020-11-05)</b>  <b>* revendications; figures *</b>                      -----</p>	<b>1 - 18</b>

Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche de type international a été effectivement achevée

**28 mai 2024**

Date d'expédition du rapport de recherche de type international

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale  
 Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

**Caubet, J**

**RECHERCHE INCOMPLÈTE  
FEUILLE SUPPLÉMENTAIRE C**

Numéro de la demande

SN 85002

BE 202305869

Certaines revendications n'ont pas fait l'objet d'une recherche parce qu'elles se rapportent à des parties de la demande qui ne remplissent pas suffisamment les conditions prescrites pour qu'une recherche significative puisse être effectuée, en particulier:

Revendications susceptibles de faire l'objet de recherches complètes:

1-18

Revendications n'ayant pas fait l'objet de recherches:

19

Raison pour la limitation de la recherche:

La définition de l'objet de la revendication de dispositif 19 portent uniquement sur un mode d'utilisation du dispositif, au lieu de définir clairement ce dispositif en termes de caractéristiques techniques. Les limitations visées ne ressortent donc pas clairement de cette revendication.

# RAPPORT DE RECHERCHE DE TYPE INTERNATIONAL

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande de recherche n

**BE 202305869**

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2022096443	A1	CN 116547100 A	04-08-2023
		DE 102020213858 A1	05-05-2022
		WO 2022096443 A1	12-05-2022
-----			
DE 102019111501	A1	AUCUN	
-----			



## OPINION ÉCRITE

Dossier N° SN85002	Date du dépôt(jour/mois/année) 19.10.2023	Date de priorité (jour/mois/année)	Demande n° BE202305869
Classification internationale des brevets (CIB) INV. B23K26/0622 B23K26/08 B23K26/70			
Déposant LASER ENGINEERING APPLICATIONS			

La présente opinion contient des indications et les pages correspondantes relatives aux points suivants :

- Cadre n° I Base de l'opinion
- Cadre n° II Priorité
- Cadre n° III Absence de formulation d'opinion quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle
- Cadre n° IV Absence d'unité de l'invention
- Cadre n° V Déclaration motivée quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle; citations et explications à l'appui de cette déclaration
- Cadre n° VI Certains documents cités
- Cadre n° VII Irrégularités dans la demande
- Cadre n° VIII Observations relatives à la demande

Formulaire BE237A (feuille de couverture) (Juillet 2022)	Examineur Caubet, J
--	------------------------

---

**Cadre n° I Base de l'opinion**

---

1. Cette opinion a été établie sur la base des revendications déposées avant le commencement de la recherche.
2. En ce qui concerne **la ou les séquences de nucléotides ou d'acides aminés** divulguées dans la demande, la présente opinion a été effectuée sur la base d'un listage des séquences
  - a.  faisant partie de la demande telle que déposée.
  - b.  remis postérieurement à la date du dépôt aux fins de la recherche,
    - accompagné d'une déclaration selon laquelle le listage des séquences ne va pas au-delà de la divulgation faite dans la demande telle que déposée.
3.  En ce qui concerne la ou les séquences de nucléotides ou d'acides aminés divulguées dans la demande, la présente opinion a été effectuée dans la mesure où une opinion valable pouvait être formulée en l'absence d'un listage des séquences conforme à la norme ST.26 de l'OMPI.
4. Commentaires complémentaires :

---

**Cadre n° III Absence de formulation d'opinion quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle**

---

La question de savoir si l'objet de l'invention revendiquée semble être nouveau, impliquer une activité inventive ou être susceptible d'application industrielle n'a pas été examinée pour ce qui concerne :

- l'ensemble de la demande
- les revendications nos 19

parce que :

- la demande ou les revendications nos. en question, se rapportent à l'objet suivant, à l'égard duquel l'administration n'est pas tenue d'effectuer une recherche:
- les revendications, la description, ou les dessins ou les revendications nos. 19 en question ne sont pas clairs, de sorte qu'il n'est pas possible de formuler une opinion valable :  
**voir feuille séparée**
- les revendications, ou les revendications nos en question, ne se fondent pas de façon adéquate sur la description, de sorte qu'il n'est pas possible de formuler une opinion valable :
- il n'a pas été établi de rapport de recherche pour toute la demande ou pour les revendications nos 19 en question.
- une opinion valable n'a pas pu être formulée en l'absence d'un listage des séquences de nucléotides ou d'acides aminés le déposant n'ayant pas fourni un listage des séquences conforme à la norme ST.26 de l'OMPI.
- Voir le cadre supplémentaire pour de plus amples détails.

## OPINION ÉCRITE

Demande n°  
BE202305869

---

**Cadre n° V Opinion motivée quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle; citations et explications à l'appui de cette déclaration**

---

1. Déclaration

Nouveauté	Oui : Revendications	1-18
	Non : Revendications	
Activité inventive	Oui : Revendications	1-18
	Non : Revendications	
Possibilité d'application industrielle	Oui : Revendications	1-18
	Non : Revendications	

2. Citations et explications

**voir feuille séparée**

**Ad point III**

**Absence de formulation d'opinion quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle**

La définition de l'objet de la revendication de dispositif 19 portent uniquement sur un mode d'utilisation du dispositif, au lieu de définir clairement ce dispositif en termes de caractéristiques techniques. Les limitations visées ne ressortent donc pas clairement de cette revendication.

**Ad point V**

**Déclaration motivée quant à la nouveauté, l'activité inventive et la possibilité d'application industrielle ; citations et explications à l'appui de cette déclaration**

1 Il est fait référence aux documents suivants :

D1 WO 2022/096443 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 12 mai 2022 (2022-05-12)

D2 DE 10 2019 111501 A1 (PULSAR PHOTONICS GMBH [DE]) 5 novembre 2020 (2020-11-05)

2 D1, qui est considéré comme l'état de la technique le plus proche de l'objet de la revendication 1, divulgue :

Procédé de contrôle d'un point de focalisation d'un faisceau laser émis par une source laser d'impulsions ultra-courtes de haute puissance, le procédé comprenant les étapes de

- Fourniture d'une source laser haute puissance ;
- Activation de la source laser ;
- Contrôle du point de focalisation du faisceau laser.

Par conséquent, l'objet de la revendication 1 diffère de ce procédé connu en ce que ledit contrôle du point de focalisation est effectué en imposant un mode rafale à ladite source laser de sorte à générer un faisceau laser comprenant un train d'impulsions comprenant des ensembles d'impulsions laser, les ensembles d'impulsions étant répétées dans le temps.

Le problème que la présente invention se propose de résoudre peut être considéré comme l'amélioration de la précision du contrôle du point de focalisation.

La solution à ce problème, proposée dans la revendication 1 de la présente demande, est considérée comme impliquant une activité inventive pour les motifs suivants :

Il n'est pas suggéré dans l'état de la technique que les variations de focalisation lors d'une rafale de plusieurs trains d'impulsion sont inférieures à ce qu'on obtient avec une impulsion unique ou un unique train d'impulsions. Ainsi, l'homme du métier n'appliquerait donc pas cette solution dans la méthode de D1 sans exercer une activité inventive.

- 3 Les revendications 2-18 dépendent de la revendication 1 et satisfont donc également, en tant que telles, aux exigences de nouveauté et d'activité inventive.