

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
9 août 2007 (09.08.2007)

PCT

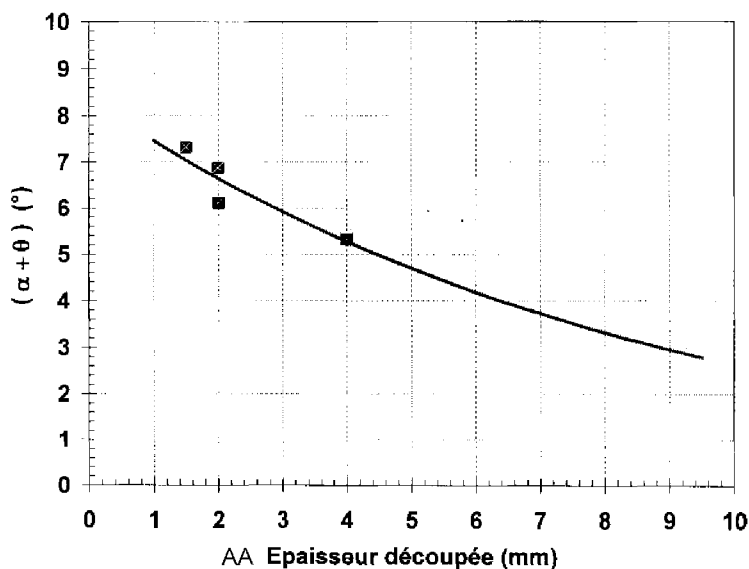
(10) Numéro de publication internationale
WO 2007/088295 A1

- (51) Classification internationale des brevets :
B23K 26/38 (2006.01) *B23K 26/14* (2006.01)
B23K 26/06 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2007/050673
- (22) Date de dépôt international :
22 janvier 2007 (22.01.2007)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
0650382 3 février 2006 (03.02.2006) FR
- (71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) : **L'AIR LIQUIDE SOCIETE ANONYME POUR L'ETUDE ET L'EXPLOITATION DES PROCÉDES GEORGES CLAUDE** [FR/FR]; 75 quai d'Orsay, F-75007 Paris (FR). **AIR LIQUIDE WELDING FRANCE** [FR/FR]; 75 quai d'Orsay, F-75007 Paris (FR).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **BRIAND, Francis** [FR/FR]; 62 rue Saint Lazare, F-75009 Paris (FR). **CHOUF, Karim** [FR/FR]; 56 rue Victor Hugo, F-92300 Levallois Perret (FR). **MAAZAOUI, Hakim** [FR/FR]; 31 rue de l'Aven, F-95800 Cergy St Christophe (FR). **VERNA, Eric** [FR/FR]; 34 rue Pasteur, F-95650 Boissy l'Aillier (FR).
- (74) Mandataire : **PITTIS, Olivier**; L'Air Liquide, SA, 75 quai d'Orsay, F-75321 PARIS CEDEX 07 (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: CUTTING METHOD USING A LASER HAVING AT LEAST ONE YTTERBIUM-BASED FIBRE, IN WHICH AT LEAST THE POWER OF THE LASER SOURCE, THE DIAMETER OF THE FOCUSED BEAM AND THE BEAM QUALITY FACTOR ARE CONTROLLED

(54) Titre : PROCÉDE DE COUPAGE AVEC UN LASER AYANT AU MOINS UNE FIBRE A BASE D' YTTERBIUM AVEC CONTROLE D' AU MOINS DEL LA PUISSANCE DE LA SOURCE LASER, DU DIAMETRE DU FAISCEAU FOCALISE ET DU FACTEUR QUALITE DU FAISCEAU



AA CUT THICKNESS (MM)

(57) Abstract: The invention relates to method for cutting a part using a laser beam, involving the use of laser beam generation means comprising at least one ytterbium-based fibre having a wavelength of between 1 and 4 μm in order to generate the laser beam. The laser beam is selected to have a power of less than 100 kW, a power density of at least 1 MW/cm², a focused beam diameter of at least 0.1 mm and a quality factor (BPP) of less than 10 mm.mrad.

[Suite sur la page suivante]

WO 2007/088295 A1



SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) **Abrégé :** L'invention porte sur un procédé de coupage par faisceau laser d'une pièce, dans lequel on utilise des moyens de génération de faisceau laser comprenant au moins une fibre à base d'ytterbium ayant une longueur d'onde entre 1 et 4 μm pour générer le faisceau laser. Ledit faisceau laser est sélectionné de manière à présenter une puissance inférieure à 100 kW, une densité de puissance d'au moins 1 MW/cm², un diamètre de faisceau focalisé d'au moins 0,1 mm et un facteur de qualité (BPP) inférieur à 10 mm.mrad.

PROCEDE DE COUPAGE AVEC UN LASER AYANT AU MOINS UNE FIBRE A BASE D'YTTERBIUM AVEC CONTROLE D'AU MOINS DEL LA PUISSANCE DE LA SOURCE LASER, DU DIAMETRE DU FAISCEAU FOCALISE ET DU FACTEUR QUALITE DU FAISCEAU

5 L'invention porte sur un procédé de coupage par faisceau laser utilisant une source laser de type fibre à base d'ytterbium.

Le coupage par faisceau laser en utilisant une source laser de type CO₂, pour générer un faisceau laser de longueur d'onde égale à 10.6 µm, d'une puissance allant jusqu'à 6 kW actuellement, est largement répandu dans l'industrie car ce type de source
10 donne de bonnes caractéristiques de faisceau, à savoir un bon facteur de qualité (M², BPP...) et une bonne répartition spatiale de l'énergie (TEM01*).

Il est possible avec ces sources lasers de type CO₂ de couper les métaux et leurs alliages, tels l'aluminium et ses alliages, l'acier inoxydable, l'acier carbone, l'acier doux..., ou tout autre matériau non-métallique, tel que le bois, le carton, les céramiques.

15 Cependant, les vitesses de coupe qui peuvent être atteintes et la qualité de coupe qui en résulte sont très variables selon le matériau à couper et, par ailleurs, selon les paramètres du procédé de coupage adoptés, tels que nature du gaz d'assistance, diamètre du faisceau focalisé et puissance du laser incidente. De plus, le chemin optique doit impérativement être maintenu dans une atmosphère inerte pour éviter toute pollution et
20 conserver un milieu d'indice optique constant nécessaire à la bonne propagation du faisceau.

Pour tenter de pallier ces problèmes, il a été proposé d'utiliser en découpe laser, des dispositifs laser de type Nd:YAG. Dans ce cas, le résonateur générant le faisceau contient un milieu amplificateur solide, qui est un barreau de néodyme (Nd), et le faisceau
25 ainsi obtenu est ensuite convoyé jusqu'à la tête de focalisation via une fibre optique.

Cependant, cette solution n'est pas non plus satisfaisante au plan industriel car elle donne de mauvais résultats en termes de qualité et de vitesse de découpe, non seulement du fait de facteurs de qualité (BPP) du faisceau inadaptés à la découpe laser mais aussi d'une répartition transversale de l'énergie dans le faisceau non gaussienne mais en
30 créneau (appelé « *top hat* » en anglais), voire même aléatoire au-delà du point de focalisation.

Le problème qui se pose est alors de proposer un procédé de découpe par faisceau laser amélioré, lequel ne présente pas les inconvénients et limitations susmentionnés, et qui puisse permettre d'atteindre, selon l'épaisseur considérée, des vitesses allant jusqu'à 15
35 à 20 m/min, voire plus élevées, et une bonne qualité de coupe, c'est-à-dire des faces de coupe droites, sans bavure, avec une rugosité limitée.

La solution de l'invention est alors un procédé de coupage par faisceau laser, dans lequel on utilise des moyens de génération de faisceau laser comprenant au moins une fibre contenant de l'ytterbium pour générer un faisceau laser servant à fondre la pièce et à ainsi réaliser la découpe proprement-dite.

5 Plus précisément, l'invention porte sur un procédé de coupage par faisceau laser d'une pièce à couper, dans lequel on utilise des moyens de génération de faisceau laser comprenant au moins une fibre contenant de l'ytterbium ayant une longueur d'onde entre 1 et 4 μm pour générer le faisceau laser.

Selon l'invention, le faisceau laser est sélectionné de manière à présenter :

- 10
- une puissance inférieure à 100 kW,
 - une densité de puissance d'au moins 1 MW/cm²,
 - un diamètre de faisceau focalisé d'au moins 0,1 mm et
 - un facteur de qualité (BPP) inférieur à 10 mm.mrad.

De plus, selon l'invention, les moyens de génération de faisceau laser comprennent
15 au moins un élément exciteur, de préférence plusieurs éléments excitateurs, coopérant avec au moins un élément excité, encore appelé milieu amplificateur, pour générer le faisceau laser. Les éléments excitateurs sont préférentiellement plusieurs diodes laser, alors que le ou les éléments excités est ou sont une ou préférentiellement des fibres à cœur d'ytterbium, de préférence en silice.

20 En outre, dans le cadre de l'invention, on utilise indifféremment les termes « moyens de génération de faisceau laser » et « résonateur ». Ce type de source laser est habituellement appelé source laser « à fibre » ou « à fibre d'ytterbium » puisque leur milieu amplificateur est un réseau de fibres optiques particulières dont le cœur ou noyau est à base d'ytterbium.

25 Selon le cas, le procédé de l'invention peut comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- la (ou les) fibre(s) est formée d'un cœur dopé à l'ytterbium recouvert de silice.
- le faisceau laser généré par la fibre à base d'ytterbium a une longueur d'onde entre 1.04 et 3 μm , de préférence entre 1.07 et 1.1 μm , préférentiellement égale à 1.07 μm .
- 30 - le faisceau laser a une puissance comprise entre 0.1 et 40 kW, de préférence entre 0.5 et 15 kW.
- le faisceau laser est continu ou pulsé, de préférence continu.
- la vitesse de coupe est comprise entre 0.1 et 20 m/min, de préférence de 1 à 15 m/min.
- 35 - le gaz d'assistance du faisceau laser est choisi parmi l'azote, l'hélium, l'argon, l'oxygène, le CO₂ et leurs mélanges, et éventuellement, il contient, en outre, un ou plusieurs composés additionnels choisis parmi H₂ et CH₄

- plus généralement, la pression de gaz d'assistance est comprise entre environ 0,1 bar et 25 bar, et est choisie en fonction de l'épaisseur à couper.

- le diamètre de l'orifice d'injection du gaz est compris entre 0,5 et 5 mm, typiquement entre 1 et 3 mm.

5 - le facteur de qualité du laser (BPP) est compris entre 1 et 8 mm.mrad, de préférence entre 2 et 6 mm.mrad.

- le faisceau laser a une densité de puissance entre 1,5 et 20 MW/cm².

- le diamètre de faisceau focalisé est compris entre 0,1 mm et 0,50 mm de préférence entre 0,13 mm et 0,40 mm.

10 - le faisceau laser a une valeur de longueur de Raleigh (Z_r) comprise entre 1 et 10 mm, de préférence entre 2 et 7 mm.

- l'on met en œuvre le faisceau selon une ouverture angulaire (θ) compris entre 0,25 et 5°, et un angle (α) entre 1,25 et 8° correspondant à l'angle défini par le diamètre du faisceau laser focalisé ($2W_0$) divisé par l'épaisseur (E) de la tôle, tels que la somme des

15 angles ($\alpha + \theta$) soit comprise entre 1,5 et 8°.

- la pièce à couper a une épaisseur entre 0.25 et 30 mm, de préférence entre 0.40 et 20 mm.

En fait, les principales caractéristiques du rayonnement laser qui interviennent sur le processus de découpe sont la longueur d'onde du laser, le facteur de qualité du faisceau

20 (M², K, BPP), le diamètre du faisceau mesuré en sortie de la source, la puissance laser incidente, et son mode de focalisation au voisinage de la surface du matériau à couper

La longueur d'onde des sources laser à « fibre » d'ytterbium est généralement proche de celle des laser Nd :YAG, à savoir de l'ordre de 1.07 μ m.

En général, pour ce type de source laser à fibre à ytterbium, on utilise le paramètre

25 BPP, pour « Beam Parameter Product » (produit des paramètres de faisceau), pour caractériser la qualité du faisceau. Le BPP est défini comme étant le produit du diamètre du faisceau au diamètre minimal du faisceau (ou *waist* en anglais) par son angle de divergence. Le BPP est exprimé en mm.mrad. Plus le BPP est petit, plus la qualité du faisceau est bonne.

30 D'un point de vue industriel, ces sources laser à fibre d'ytterbium présentent l'avantage de se propager jusqu'au système de focalisation à travers une fibre optique près de la zone de travail, tout en conservant une bonne qualité de faisceau. Le diamètre du faisceau disponible en sortie de source est alors égal au diamètre utile de la fibre optique qui le transporte.

35 Les puissances et les facteurs de qualité de ces faisceaux sont satisfaisants pour le processus de découpe laser, en particulier en termes de vitesse et de qualité de coupe. Les puissances disponibles avec ce type de source sont comprises entre 100 W et 40 kW et

leurs facteurs de qualité (BPP) varient entre 0.3 mm.mrad et 15 mm.mrad. En outre, le diamètre de la fibre optique de propagation change avec la puissance laser qu'elle doit délivrer. Plus la puissance est élevée, plus le diamètre de fibre est grand.

5 Ainsi, par exemple, pour une puissance de 2 kW, la fibre utilisée aura un diamètre de 50 µm et un BPP de 2 mm.mrad, alors que pour 4kW, son diamètre sera de 100 µm et son BPP de 4 mm.mrad.

10 Par ailleurs, quel que soit le type source utilisée, le faisceau laser issu de la source doit être focalisé par des moyens de focalisation, tels qu'une lentille ou un système optique particulier, par exemple des miroirs. Suivant les propriétés de la lentille utilisée, les caractéristiques du faisceau focalisées changent, entraînant une modification des performances de découpe laser. Le choix d'une lentille et de sa mise en œuvre pour focaliser le faisceau font partie des connaissances générales de l'homme du métier.

15 En pratique, on fait varier le BPP de la source laser fibre en jouant avec le nombre de fibres élémentaires contenues dans la source générant le faisceau laser. En effet, chacune des fibres élémentaires donne en général un faisceau mono-mode de BPP de l'ordre de 0,3 mm.mrds. De là, leur nombre et leur combinaison par « mise en fagot » donnent des BPP différents. Ces laser-fibres élémentaires sont, à leur tour, injectés dans une fibre optique de propagation par différents moyens. Plus le diamètre de cette fibre optique de propagation est important, plus le BPP du faisceau de sortie augmente. On peut ainsi pour 20 une puissance donnée faire varier le BPP dans une plage assez large et donc choisir le BPP que l'on souhaite, à savoir un BPP selon l'invention de moins de 10 mm.mrad, de préférence entre 1 et 8 mm.mrad, voire de préférence encore entre 2 et 6 mm.mrad.

25 La focalisation de ce faisceau sur le matériau à couper se fait en général grâce à 2 lentilles optiques dont les caractéristiques sont déterminées empiriquement par l'homme de l'art pour obtenir sur la pièce une tâche focale de diamètre voulu, à savoir un diamètre de faisceau focalisé d'au moins 0,1 mm. Ce diamètre est en général dépendant du diamètre de sortie de la fibre de propagation, des distances focales choisies et du BPP à la sortie de la fibre.

30 Enfin, la densité de puissance moyenne est le rapport entre la puissance du faisceau laser et la surface de la tâche focale obtenue avec ce faisceau laser, donc dépend essentiellement du diamètre de la tâche focale. Déterminer ces paramètres ne pose pas de difficulté particulière à un homme du métier.

35 Il s'ensuit qu'un faisceau laser focalisé possède toujours une ouverture angulaire (2θ) qui est définie comme suit :

$$\tan(\theta) = \frac{D/2}{F}$$

où : D est le diamètre du faisceau incident à la surface de la lentille et F sa longueur focale, comme schématisé sur la Figure 2.

Les performances du processus de découpe laser sont directement dépendantes de l'absorption de l'énergie laser par le matériau. Cette absorption est fonction de la nature du matériau à couper, des caractéristiques du faisceau laser notamment de la longueur d'onde, comme expliqué précédemment, mais aussi de l'angle d'incidence entre le faisceau, le matériau à couper et sa polarisation.

Ainsi, la figure 5 présente l'évolution de l'absorption d'un faisceau laser CO₂ ou Nd :YAG en fonction de son angle d'incidence et de sa polarisation, comme expliqué par *Laser with different wavelength - implication for various application* ; F. Dausinger ; Universität Stuttgart, ECLAT 90 ; Vol. 1: 3rd Conference on Laser Treatment of Materials ; p 1-14.

La longueur d'onde de 1.07 µm du laser à fibre d'ytterbium très voisine de celle de 1.06µm du laser Nd :YAG laisse présager d'une absorption d'énergie similaire au Nd:YAG, maximale avec un angle d'incidence différent de celui d'un laser CO₂.

Lors du processus de découpe, il s'établit une zone frontière stationnaire entre le métal solide et le métal liquide, appelée 'front avant' de découpe. Ce front avant s'établit, en fonction de la vitesse d'avance et des caractéristiques du faisceau avec un angle α invariant tout au long de la coupe.

On définit l'angle α maximal, schématisé dans la figure 3, comme une grandeur théorique correspondant à l'angle atteint par le front avant de métal en fusion pendant la découpe et ce, à la vitesse de coupe maximale choisie, telle que :

$$\tan(\alpha) = \frac{2W_0}{E}$$

où : (2.W₀) correspond au diamètre minimum du faisceau focalisé et E à l'épaisseur de la pièce à couper.

Plus la tôle à couper est épaisse (E), pour un faisceau laser donné, plus la valeur de l'angle α est faible. Plus la tache focale est grande, pour une épaisseur de matériau à couper donnée, plus la valeur de l'angle α est élevée.

L'angle maximal d'incidence du faisceau par rapport au front avant est donc défini par l'angle ($\alpha + \theta$) . Cet angle correspond en quelque sorte à l'angle du rayon extrême du faisceau laser avec le front avant de découpe.

Un autre aspect important dans le processus de découpe est la capacité de distribuer, sans grande variation, l'énergie laser au cœur de l'épaisseur du matériau. La longueur de Raleigh, ou profondeur de champ, est la distance du « waist » dans l'axe de propagation du faisceau dans laquelle le diamètre du faisceau n'augmente pas plus de 5%.

On considère que, dans cette région, la distribution d'énergie n'évolue pas de manière significative et que cette valeur doit être reliée à l'épaisseur du matériau à découper.

La distance de Raleigh Zr peut être reliée au facteur de qualité du faisceau BPP par la relation suivante :

$$Zr = \frac{W_0^2}{BPP}$$

dans laquelle w_0 est le diamètre du faisceau au « waist ».

Il est donc primordial de prendre en compte le facteur de qualité et donc la longueur de Raleigh si l'on souhaite améliorer le procédé de découpe.

On comprend alors qu'il convient également de prendre en compte le diamètre du faisceau laser focalisé Φ pour pouvoir espérer améliorer le processus de découpe car ce paramètre influe directement sur l'angle α et par conséquent sur l'absorption du faisceau au travers de la somme $\alpha + \theta$.

Partant de là, en s'intéressant tout particulièrement à ces différents paramètres, on a réalisé les essais comparatifs consignés ci-après en adoptant notamment les paramètres et conditions donnés dans le Tableau ci-dessous.

Durant ces essais, on a utilisé l'installation schématisée sur la Figure 1 pour réaliser le coupage par faisceau laser 3 d'une pièce 10 en acier inoxydable. Cette installation comprend une source laser 1 de 2kW à résonateur 2 ou moyens de génération de faisceau laser comprenant une fibre en silice à cœur dopé à l'ytterbium pour générer un faisceau laser 3 de longueur d'onde de 1.07 μm .

Le faisceau 3 se propage à travers des moyens de convoyage de faisceau 4, telle qu'une fibre optique en silice fondue de diamètre de 50 μm ou 100 μm , selon le cas, jusqu'à la zone d'interaction 11 entre le faisceau 3 et la pièce 10 où le faisceau va frapper la pièce à couper et fondre le matériau constitutif de ladite pièce en formant ainsi progressivement la saignée de coupe par déplacement du front avant.

En sortie de cette fibre 4, le faisceau laser 3 possède des caractéristiques optiques particulières et un facteur de qualité (BPP) de 2 ou 4,2 mm.mrad, respectivement ($\pm 0.2\text{mm.mrad}$) selon le diamètre de fibre considéré. Le faisceau 3 est ensuite collimaté avec un collimateur optique 5 équipé d'un doublet de collimation en silice fondu revêtu de manière à limiter la divergence du faisceau en sortie de fibre et le rendre le faisceau laser parallèle.

Le faisceau 3 parallèle selon le principe schématisé sur les Figures 2 et 3, est ensuite focalisé sur ou dans la pièce 10 à couper d'épaisseur E par une lentille 6 en silice fondue revêtu de longueur focale comprise entre 5 mm et 7,5 mm, comme donné dans le

Tableau ci-après. Avant de venir frapper la pièce 10, le faisceau 3 traverse axialement la tête laser 5 équipée d'une buse 7 comprenant un orifice 8 de sortie axial situé en regard de la pièce à couper 10 par lequel passent le faisceau 3 et le gaz d'assistance. L'orifice de la buse peut être compris entre 0.5 mm et 5 mm, de préférence entre 1 mm et 3 mm.

5 La tête laser 5 est alimentée, quant à elle, en gaz d'assistance via une entrée 9 de gaz, par exemple un gaz inerte tel l'azote, l'argon, l'hélium ou un mélange de plusieurs de ces gaz, ou alors un gaz actif, tel l'oxygène par exemple, voire des mélanges de gaz actif et de gaz inerte ; le choix du gaz à utiliser se faisant en fonction du matériau à couper.

10 Le gaz d'assistance sous pression sert à évacuer le métal en fusion hors de la saignée 12 de coupe se formant dans la pièce 10, lors du déplacement relatif de la pièce par rapport à la tête laser 5 selon la trajectoire de coupe désirée. La solution inverse consistant à bouger la tête de coupe en conservant la pièce statique conduit au même résultat.

15 Les valeurs des autres paramètres (Zr, BPP, angles...) sont données dans le Tableau suivant.

Tableau

Epaisseur E	Longueur focale	Diamètre de fibre	θ	α	$\alpha + \theta$	diamètre du spot focalisé	Zr	Densité de puissance	BPP
(mm)	(mm)	(μm)	($^\circ$)	($^\circ$)	($^\circ$)	(mm)	(mm)	(MW/cm ²)	(mm.mrad)
1.5	127	50	1.5	5.7	7.2	0.15	2.8	11.5	2
2	127	50	1.5	4.6	6.1	0.16	3	10	2.1
2	190.5	50	1	5.9	6.9	0.21	5.8	6	1.8
4	95.25	100	2.2	3.2	5.4	0.22	2.9	5.2	4.3
4	127	100	1.7	4	5.7	0.28	4.8	3.2	4.1
4	190.5	100	1.4	4.9	6.3	0.34	6.9	2.1	4.3
6	228.6	100	1.2	3.9	5.1	0.40	9.8	1.5	4.2

Les essais de découpe ont été réalisés sur des pièces en acier inoxydable ayant des épaisseurs comprises entre 1,5 mm et 6 mm.

20 Le gaz utilisé est de l'azote et est injecté dans la zone d'interaction du faisceau avec la pièce à des pressions variables comprises entre 0.6 et 25 bar, à travers une buse de découpe laser présentant une orifice de diamètre de 1.5 pour les épaisseurs 1.5 et 2 et de 2 mm pour les épaisseurs 4 et 6 mm.

25 Les résultats obtenus ayant donné de bons résultats en termes de qualité de coupe ont été positionnés sur la Figure 4. On voit que la courbe extrapolée à partir des points de

résultats obtenus met en évidence qu'il existe une relation étroite entre la somme des angles ($\alpha + \theta$) (en ordonnées) et l'épaisseur (E) de la pièce à couper (en abscisses).

Dit autrement, les résultats obtenus montrent que la découpe avec une source de faisceau laser de type à « fibre » d'ytterbium, de longueur d'onde de 1.07 μm , ne sont satisfaisants que si tout ou partie des conditions suivantes sont réunies :

- la puissance du faisceau est comprise entre 1 et 100 kW.

- la densité de puissance focalisée est d'au moins 1 MW/cm², de préférence comprise entre 1 MW/cm² et 100 MW/cm², avantageusement d'au moins 3 MW/cm², voire d'au moins 3,2 MW/cm².

- le diamètre du faisceau laser focalisé (Φ) est d'au moins 0,1 mm, de préférence de 0.15 à 0.3 mm.

- le facteur de qualité (BPP) est inférieur à 10 mm.mrad, de préférence de 1.5 à 6 mm.mrad.

- la somme des angles ($\alpha + \theta$) doit suivre la courbe d'évolution suivante, à savoir un angle compris entre 1° et 8°, pour des plaques d'épaisseurs comprises entre 1 mm et 15 mm.

- la longueur de Raleigh Zr est comprise entre 0.1 mm et 40 mm, avantageusement, on choisit une valeur pour Zr correspondant au moins à la moitié de l'épaisseur E de la tôle à couper

Ainsi, à titre d'exemple, on peut citer les deux derniers jeux de paramètres présentés dans le tableau qui ont donnés des coupes présentant des bavures. L'analyse montre qu'ils ne vérifient pas les critères susmentionnés, en particulier une non-correspondance entre l'angle ($\alpha + \theta$) et l'épaisseur coupée, et une densité de puissance trop faible.

Revendications

1. Procédé de coupage par faisceau laser d'une pièce à couper, dans lequel on utilise des moyens de génération de faisceau laser comprenant au moins une fibre contenant de l'ytterbium ayant une longueur d'onde entre 1 et 4 μm pour générer le faisceau laser, caractérisé en ce que ledit faisceau laser est sélectionné de manière à présenter :

- une puissance inférieure à 100 kW,
- une densité de puissance d'au moins 1 MW/cm²,
- un diamètre de faisceau focalisé d'au moins 0,1 mm et
- un facteur de qualité (BPP) inférieur à 10 mm.mrad.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la fibre est formée d'un coeur dopé à l'ytterbium recouvert de silice.

3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que le faisceau laser généré par la fibre à base d'ytterbium a une longueur d'onde entre 1.04 et 3 μm , de préférence de 1.07 μm .

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le facteur de qualité du laser (BPP) est compris entre 1 et 8 mm.mrad, de préférence entre 2 et 6 mm.mrad.

5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le faisceau laser a une puissance comprise entre 0.1 et 40 kW, de préférence entre 0.5 et 15 kW.

6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le faisceau laser a une densité de puissance entre 1,5 et 20 MW/cm².

7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que le diamètre de faisceau focalisé est compris entre 0,1 mm et 0,50 mm de préférence entre 0,13 mm et 0,40 mm.

8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le faisceau laser a une valeur de longueur de Raleigh (Zr) comprise entre 1 et 10 mm, de préférence entre 2 et 7 mm.

9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que l'on met en œuvre le faisceau selon une ouverture angulaire (θ) compris entre 0,25 et 5°, et un angle α entre 1,25 et 8° correspondant à l'angle défini par le diamètre du faisceau laser focalisé ($2W_0$) divisé par l'épaisseur E) de la tôle, tels que la somme des angles ($\alpha + \theta$) soit comprise entre 1,5 et 8°.

10. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que le gaz d'assistance du faisceau laser est choisi parmi l'azote, l'hélium, l'argon, l'oxygène, le CO₂ et leurs mélanges, et éventuellement, il contient, en outre, un ou plusieurs composants additionnels choisis parmi H₂ et CH₄.

11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que la pièce à couper a une épaisseur entre 0.25 et 30 mm, de préférence entre 0.40 et 20 mm.

15

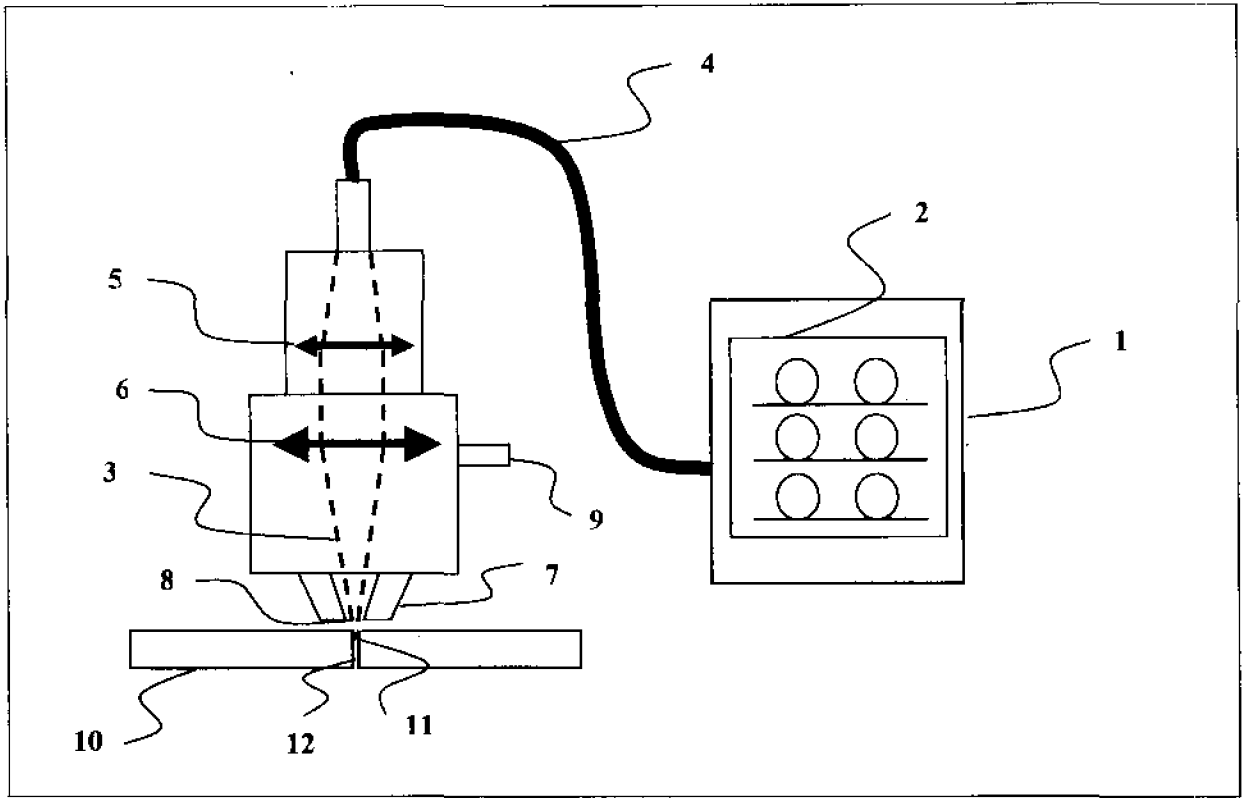


FIGURE 1

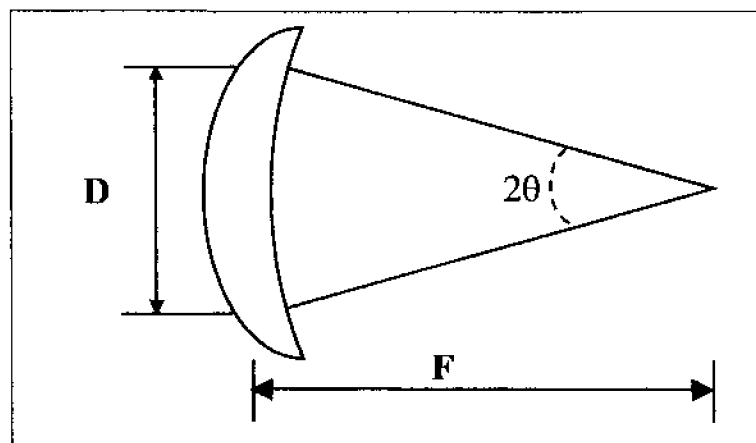


FIGURE 2

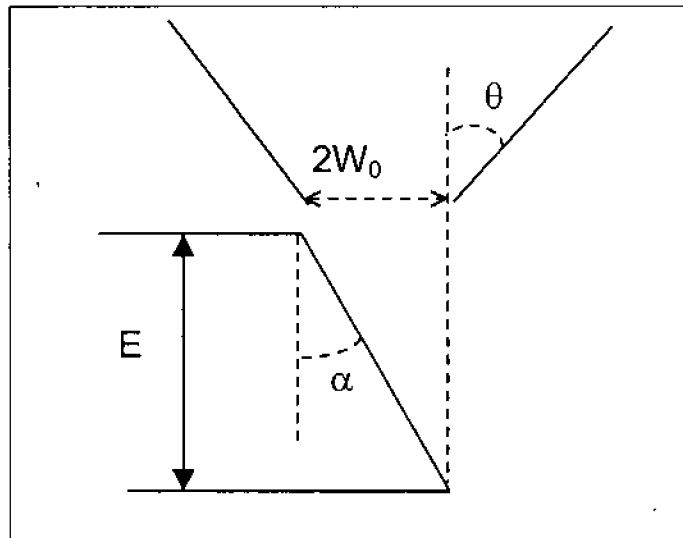


FIGURE 3

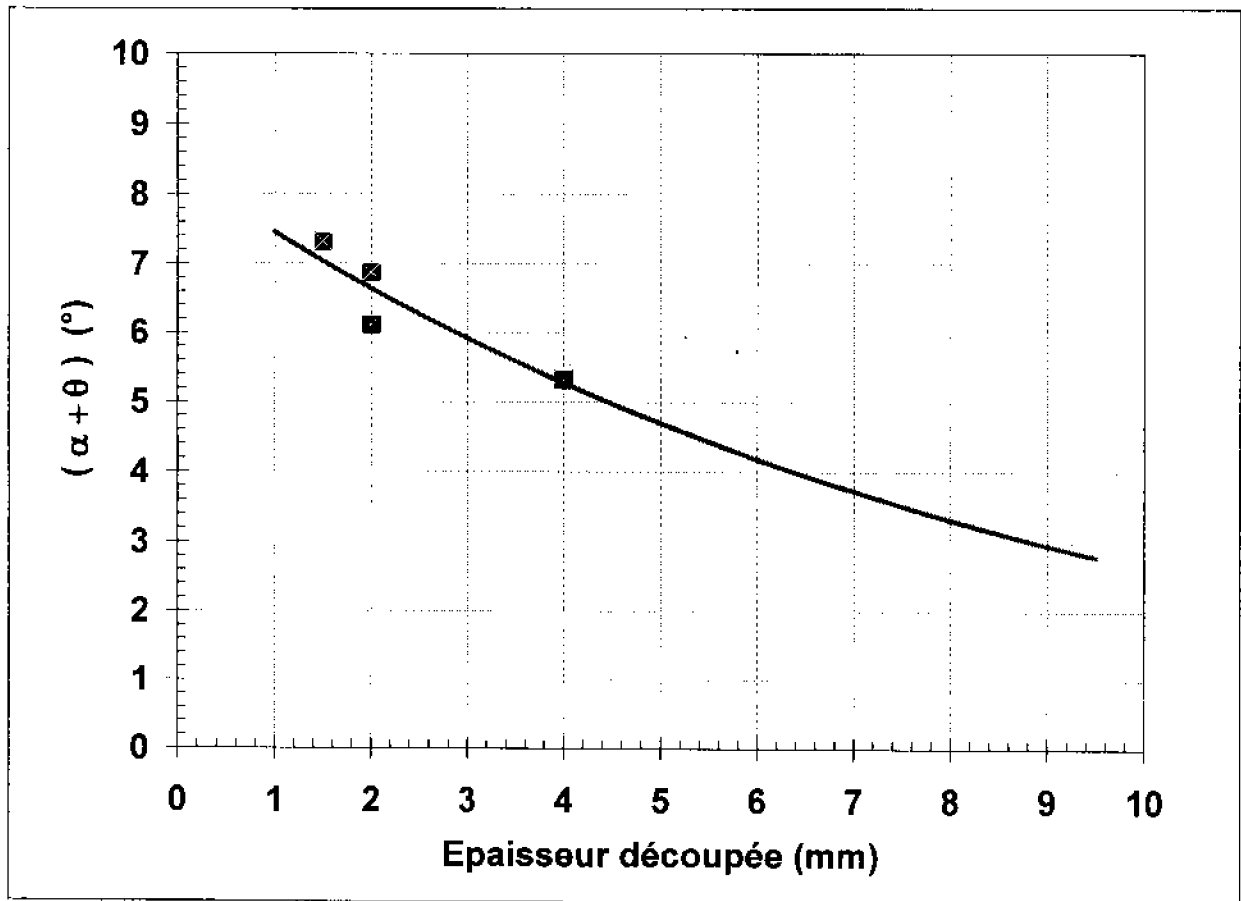


FIGURE 4

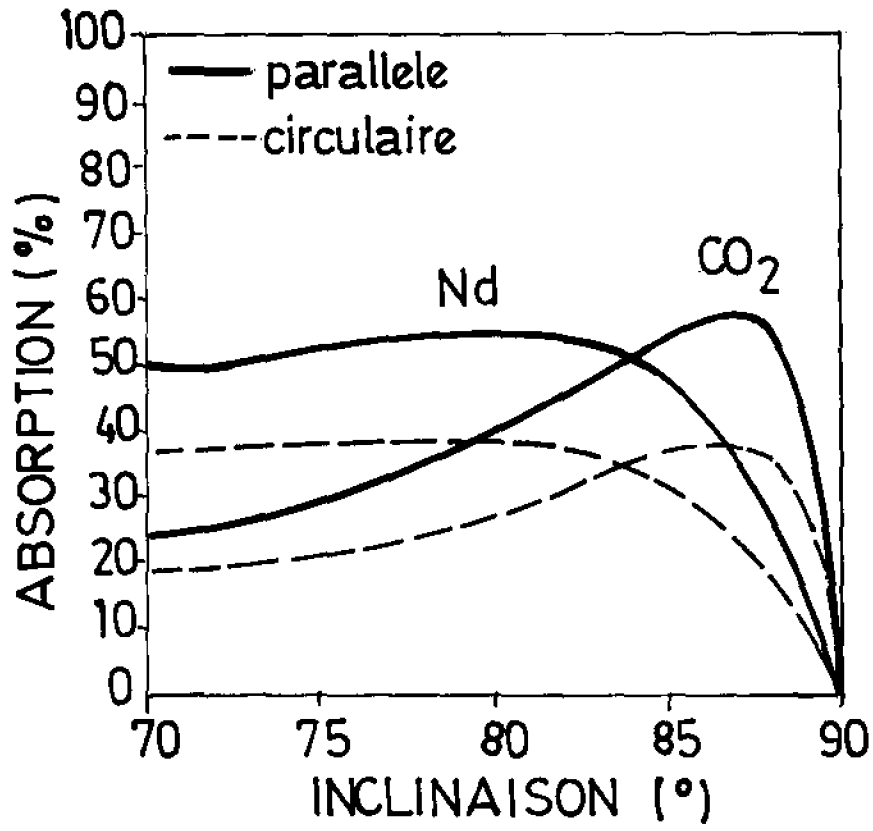


FIG.5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2007/050673

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. B23K26/38 B23K26/06 B23K26/14

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
B23K H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
E	EP 1 790 427 A (AIR LIQUIDE ET AL) 30 May 2007 (2007-05-30) paragraphs [0025] - [0028], [0031], [0037] - [0039]; claims; figures	1-11
Y	DE 10 2004 024475 A1 (LZH LASERZENTRUM HANNOVER E V) 1 December 2005 (2005-12-01)	1-7,9,11
A	paragraphs [0001], [0006], [0001], [0012], [0031], [0038], [0039]; figure 1	8,10
Y	US 2003/189959 A1 (G.V. ERBERT ET AL) 9 October 2003 (2003-10-09) paragraphs [0003] - [0005], [0015], [0030]	1-7,9,11
	----- -/--	

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

<p>*A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>*E* earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>*L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>*O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>*P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>*T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>*X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>*Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.</p> <p>* & * document member of the same patent family</p>
--	--

Date of the actual completion of the international search 12 June 2007	Date of mailing of the international search report 22/06/2007
--	---

Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5618 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Jeggy, Thierry
---	---

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2007/050673

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 10 2004 027625 A1 (TRUMPF LASER GMBH & CO KG) 5 January 2006 (2006-01-05) paragraph [0031]; claims 1,2; figures -----	1-7,9,11
Y	US 6 208 458 B1 (A. GALVANAUSKAS ET AL) 27 March 2001 (2001-03-27) column 14, line 38 - column 15, line 5 column 15, line 42 - column 16, line 22 -----	1-5,7,11
Y	US 2003/055413 A1 (G.B. ALTSHULER ET AL) 20 March 2003 (2003-03-20) paragraph [0019]; table 1 -----	1-5,7,11
A	EP 1 607 487 A (NIPPON STEEL CORP) 21 December 2005 (2005-12-21) paragraphs [0029] - [0033] -----	1-11
A	EP 0 374 741 A2 (AE TURBINE COMPONENTS) 27 June 1990 (1990-06-27) page 4, lines 14-25 -----	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/FR2007/050673

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 1790427 A	30-05-2007	CA 2568030 A1 FR 2893872 A1 US 2007119833 A1	25-05-2007 01-06-2007 31-05-2007
DE 102004024475 A1	01-12-2005	EP 1747081 A1 WO 2005115678 A1	31-01-2007 08-12-2005
US 2003189959 A1	09-10-2003	NONE	
DE 102004027625 A1	05-01-2006	EP 1761978 A1 WO 2005122345 A1	14-03-2007 22-12-2005
US 6208458 B1	27-03-2001	DE 19812203 A1 JP 3598216 B2 JP 10268369 A US 6181463 B1	24-09-1998 08-12-2004 09-10-1998 30-01-2001
US 2003055413 A1	20-03-2003	NONE	
EP 1607487 A	21-12-2005	CN 1761764 A WO 2004083465 A1 KR 20050115285 A US 2006169362 A1	19-04-2006 30-09-2004 07-12-2005 03-08-2006
EP 0374741 A2	27-06-1990	CA 2005936 A1 GB 2227440 A JP 2211972 A US 5064990 A	21-06-1990 01-08-1990 23-08-1990 12-11-1991

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/FR2007/050673

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. B23K26/38 B23K26/06 B23K26/14		
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 H01S		
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 cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
E	EP 1 790 427 A (AIR LIQUIDE ET AL) 30 mai 2007 (2007-05-30) alinéas [0025] - [0028], [0031], [0037] - [0039]; revendications; figures	1-11
Y	DE 10 2004 024475 A1 (LZH LASERZENTRUM HANNOVER E V) 1 décembre 2005 (2005-12-01)	1-7,9,11
A	alinéas [0001], [0006], [0001], [0012], [0031], [0038], [0039]; figure 1	8,10
Y	US 2003/189959 A1 (G.V. ERBERT ET AL) 9 octobre 2003 (2003-10-09) alinéas [0003] - [0005], [0015], [0030]	1-7,9,11
A	DE 10 2004 027625 A1 (TRUMPF LASER GMBH & CO KG) 5 janvier 2006 (2006-01-05) alinéa [0031]; revendications 1,2; figures	1-7,9,11
	-/--	
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> 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 international 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 international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée *T* document ultérieur publié après la date de dépôt international 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 internationale a été effectivement achevée 12 juin 2007		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 22/06/2007
Norm 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, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Jeggy, Thierry

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/FR2007/050673

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	US 6 208 458 B1 (A. GALVANAUSKAS ET AL) 27 mars 2001 (2001-03-27) colonne 14, ligne 38 - colonne 15, ligne 5 colonne 15, ligne 42 - colonne 16, ligne 22 -----	1-5,7,11
Y	US 2003/055413 A1 (G.B. ALTSHULER ET AL) 20 mars 2003 (2003-03-20) alinéa [0019]; tableau 1 -----	1-5,7,11
A	EP 1 607 487 A (NIPPON STEEL CORP) 21 décembre 2005 (2005-12-21) alinéas [0029] - [0033] -----	1-11
A	EP 0 374 741 A2 (AE TURBINE COMPONENTS) 27 juin 1990 (1990-06-27) page 4, ligne 14-25 -----	1

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2007/050673

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 1790427	A	30-05-2007	CA 2568030 A1 FR 2893872 A1 US 2007119833 A1	25-05-2007 01-06-2007 31-05-2007
DE 102004024475	A1	01-12-2005	EP 1747081 A1 WO 2005115678 A1	31-01-2007 08-12-2005
US 2003189959	A1	09-10-2003	AUCUN	
DE 102004027625	A1	05-01-2006	EP 1761978 A1 WO 2005122345 A1	14-03-2007 22-12-2005
US 6208458	B1	27-03-2001	DE 19812203 A1 JP 3598216 B2 JP 10268369 A US 6181463 B1	24-09-1998 08-12-2004 09-10-1998 30-01-2001
US 2003055413	A1	20-03-2003	AUCUN	
EP 1607487	A	21-12-2005	CN 1761764 A WO 2004083465 A1 KR 20050115285 A US 2006169362 A1	19-04-2006 30-09-2004 07-12-2005 03-08-2006
EP 0374741	A2	27-06-1990	CA 2005936 A1 GB 2227440 A JP 2211972 A US 5064990 A	21-06-1990 01-08-1990 23-08-1990 12-11-1991