

(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
14 décembre 2017 (14.12.2017)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2017/211840 A1

(51) Classification internationale des brevets :
B64G 1/56 (2006.01) *B64G 1/68* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2017/063729

(22) Date de dépôt international :
06 juin 2017 (06.06.2017)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1655218 07 juin 2016 (07.06.2016) FR

(71) Déposant : ECOLE POLYTECHNIQUE [FR/FR] ;
Route de Saclay, 91120 PALAISEAU (FR).

(72) Inventeurs : MOUROU, Gérard ; 25, avenue Reille,
75014 PARIS (FR). CHANTELOUP, Jean-Christophe
; 17 rue Emile Zola, 91400 Saclay (FR). MARJORI-
BANKS, Robin ; 148 Macdonell Ave., Toronto, ON,
M6R-2A6 (CA).

(74) Mandataire : CABINET NONY ; 11 rue Saint-Georges,
75009 PARIS (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK,
MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA,
PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD,

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR CHANGING THE MOMENTUM OF SOLIDS IN SPACE

(54) Titre : PROCÉDÉ ET SYSTÈME POUR MODIFIER LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT DE SOLIDES DANS L'ESPACE

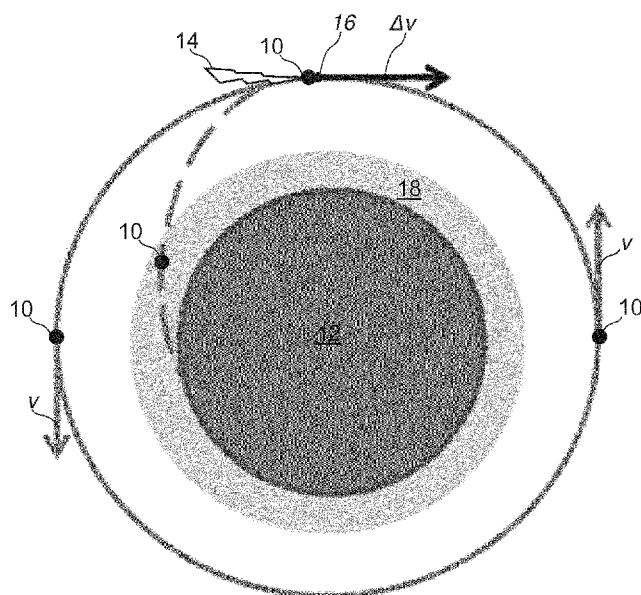


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a method for changing the momentum of a solid (10) in space, more particularly a piece of debris (10), comprising the steps of irradiating said solid (10) using at least one high-intensity laser pulse in order to cause ionization of a portion of the solid (10) to a plasma state; and irradiating said portion of the solid (10) in the plasma state using a sequence of low-intensity laser pulses in order to heat said portion of the solid (10) and cause ejection of ejecta (16) from said solid (10). The invention further relates to a system that can be used to implement the method.

(57) Abrégé : L'invention porte sur un procédé de modification de la quantité de mouvement d'un solide (10) dans l'espace, plus particulièrement d'un débris (10), comprenant les étapes d'irradiation dudit solide (10) par au moins une impulsion laser de haute

[Suite sur la page suivante]



WO 2017/211840 A1

SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, 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, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

intensité pour provoquer l'ionisation d'une partie du solide (10) jusqu'à un état de plasma; et d'irradiation de ladite partie du solide (10) à l'état de plasma par un train d'impulsions laser de faible intensité pour provoquer réchauffement de ladite partie du solide (10) et l'éjection d'un éjecta (16) à partir dudit solide (10). L'invention porte en outre sur un système utilisable pour mettre en œuvre le procédé.

PROCÉDÉ ET SYSTÈME POUR MODIFIER LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT DE SOLIDES DANS L'ESPACE

La présente invention porte sur un procédé et un système pour modifier la
5 quantité de mouvement de solides dans l'espace, et notamment de débris dans l'espace.

En plus de cinquante ans de vols spatiaux, plus de 30 000 t de satellites et de
fusées ont été envoyées dans l'espace. On estime qu'il subsiste près de 3 000 t de débris
spatiaux non opérationnels en orbite terrestre basse (de l'anglais « Low Earth Orbit » ou
LEO) et ce sous diverses formes allant de fragments à des corps de fusées hors d'usage et
10 des satellites de plusieurs tonnes parfaitement intacts. Des collisions avec ces débris peuvent
mettre en jeu une vitesse d'impact de l'ordre de 10 km/s et occasionner ainsi des dégâts
graves voire catastrophiques sur des satellites opérationnels tels que la Station Spatiale
Internationale (de l'anglais « International Space Station » ou ISS).

La majorité des engins spatiaux, y compris la station ISS, peuvent tolérer des
15 débris de moins de 1 cm grâce à un blindage adapté. Il est possible de réduire les risques liés
aux objets de plus de 10 cm par des manœuvres anticollision à condition toutefois d'avoir
déjà identifié ces débris et d'en avoir suivi la trajectoire.

Or la grande majorité des débris, notamment ceux dont la taille est inférieure à
10 cm, n'est pas connue ou répertoriée, si bien que ces projectiles hypervéloces posent un
20 risque de plus en plus grand pour les engins spatiaux en nombre toujours croissant. Les débris
de petite taille de l'ordre du cm constituent donc la principale menace d'impact avec les
charges utiles opérationnelles et abandonnées.

La petite taille de ces projectiles et leur vitesse relative élevée font qu'il existe
peu de solutions viables permettant de les éliminer avant qu'ils n'entrent en collision avec
25 de plus gros satellites ou engins spatiaux.

La demande de brevet US 2006/0256318 A1 divulgue un système et un procédé
permettant de générer une poussée sur un corps distant à l'aide de deux faisceaux laser. Cette
demande concerne en particulier un système de défense anti-missile.

La demande de brevet FR 2656587 A1 divulgue un procédé et un dispositif qui
30 visent à modifier la trajectoire de débris spatiaux à l'aide d'un rayonnement de volatilisation.

Une solution est présentée dans l'article de T. Ebisuzaki, et coll., "Demonstration
designs for the remediation of space debris from the International Space Station", Acta

Astronautica 112 (2015) 102-113, 13 Mars 2015. D'après cet article, une solution passe essentiellement par la détection, le suivi et la maîtrise par impulsions laser des débris de petite taille. La détection d'un débris s'effectue de manière passive au moyen d'une caméra à champ de vision super large. Le débris est ensuite suivi de manière active par un télescope à champ de vision étroit. La quantité de mouvement du débris est ensuite modifiée par ablation laser. En effet, la concentration d'un faisceau laser de forte intensité sur une petite surface du débris provoque l'éjection de matière sous forme de plasma d'ablation, à condition que l'intensité du laser soit supérieure au seuil d'ablation. Pour un dépôt d'énergie donné, l'impact de réaction obtenu est largement supérieur à celui de la pression de rayonnement du faisceau laser dans la mesure où la vitesse de la matière ablatée est largement inférieure à la vitesse de la lumière. Ce phénomène est illustré sur la figure 1. Un débris spatial 10 possède une vitesse v telle qu'il est en orbite autour de la Terre 12, ce débris spatial 10 présentant une taille inférieure à 10 cm. Une impulsion laser 14 est dirigée vers ce débris, l'intensité de ladite impulsion laser 14 suffisant à créer un éjecta 16 du débris 10, occasionnant une variation de vitesse Δv opposée à la vitesse du débris 10. La quantité de mouvement du débris s'en trouve donc modifiée, provoquant une décélération du débris qui se traduit par un changement d'orbite et une rentrée dans l'atmosphère terrestre 18 où il pourra être détruit. En variante, le débris 10 se trouve ainsi dirigé vers la surface de la Terre 12.

On peut noter ici que ce procédé permet, en variante, d'accélérer un débris spatial de façon à en élargir l'orbite.

L'invention a pour but d'améliorer le procédé et le système présentés dans cet article. L'invention vise plus particulièrement à optimiser, pour une énergie d'impulsion laser donnée, la masse de l'éjecta issu du débris.

Par ailleurs, l'article "3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser", de C. KERSE, et coll., Optics Communications (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2015.12.064>, présente un système amplificateur laser Yb tout-fibre avec une fréquence de récurrence intra-salve de 3,5 GHz. Le système est susceptible de produire des salves d'une durée de 15 ns minimum contenant environ 50 impulsions avec une énergie totale de 215 μ J à une fréquence de récurrence des salves de 1 kHz. Les impulsions individuelles sont comprimées à une échelle inférieure à la

picoseconde. Ce système est capable d'exploiter l'élimination de matière au laser à refroidissement par ablation.

Selon un premier objet, la présente invention concerne un procédé de modification de la quantité de mouvement d'un solide dans l'espace, plus particulièrement d'un débris, comprenant les étapes suivantes :

a) Irradiation dudit solide par au moins une impulsion laser de haute intensité pour provoquer l'ionisation d'une partie du solide jusqu'à un état de plasma ; et

b) Irradiation de ladite partie du solide à l'état de plasma par un train d'impulsions laser de faible intensité pour provoquer l'échauffement de ladite partie du solide et l'éjection d'un éjecta à partir dudit solide.

L'invention vise par conséquent à maximiser la masse de l'éjecta avec une faible vitesse. En effet, comme la quantité de mouvement $p = m.v$, où m est la masse de l'éjecta et v sa vitesse, pour une quantité donnée d'énergie laser, la variation de quantité de mouvement maximale est produite par un éjecta de plus grande masse et de plus faible vitesse plutôt que par un éjecta de plus faible masse et de plus grande vitesse.

Selon des modes de réalisation préférés, le procédé selon l'invention présente une ou plusieurs caractéristiques ci-dessous, seules ou combinées :

- la fluence de ladite impulsion laser de haute intensité est supérieure à 10 fois la fluence desdites impulsions laser de faible intensité, de préférence à 100 fois la fluence desdites impulsions laser de faible intensité ;

- la durée de ladite impulsion laser de haute intensité est inférieure ou égale à 10 ps, de préférence inférieure ou égale à 1 ps ;

- à l'étape a), le solide est irradié par au moins deux impulsions laser de haute intensité ;

- chaque impulsion laser de faible intensité a une durée inférieure ou égale à 1 ns, de préférence inférieure ou égale à 100 ps ;

- deux impulsions successives dudit train d'impulsions laser de faible intensité sont séparées d'un intervalle de temps plus long que 100 ps et/ou plus court que 10 ns, de préférence 1 ns, lequel train d'impulsions laser de faible intensité dure de préférence moins de 100 ns, et de préférence encore moins de 10 ns ;

- le rapport de la fluence des impulsions laser de faible intensité sur la fluence de l'impulsion laser haute intensité est supérieur à 1/100, de préférence supérieur à 1/10 et/ou inférieur à 1, de préférence inférieur à 1/2 ;

5 - le procédé comprend en outre une étape i) de détection d'un solide à irradier, laquelle étape i) se produit avant l'étape a) ;

- le procédé comprend en outre une étape ii) de suivi d'un solide à irradier, laquelle étape ii) se produit avant l'étape a) et après l'étape i), le cas échéant ; et

- ladite au moins une impulsion laser de haute intensité et/ou ledit train d'impulsions laser de faible intensité sont émis depuis l'espace.

10 Selon un autre aspect, l'invention porte sur un système de modification de la quantité de mouvement d'un solide dans l'espace, plus particulièrement d'un débris, comprenant un système laser, plus particulièrement un système laser ICAN, utilisable pour émettre au moins une impulsion laser de haute intensité pour provoquer l'ionisation d'une partie du solide jusqu'à un état de plasma puis un train d'impulsions laser de faible intensité
15 pour provoquer l'échauffement de ladite partie du solide et l'éjection d'un éjecta à partir dudit solide.

Selon des modes de réalisation préférés, le système selon l'invention présente une ou plusieurs caractéristiques ci-dessous, seules ou combinées :

20 - le système comprend en outre un moyen de détection destiné à détecter ledit solide ; et

- le système comprend en outre un moyen de suivi destiné à assurer le suivi dudit solide.

Le système pourra ainsi être adapté à mettre en œuvre le procédé tel que décrit plus haut dans l'une quelconque de ses variantes.

25 L'invention porte également sur un satellite ou un engin spatial comprenant un système tel que décrit plus haut dans l'ensemble de ses variantes.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront plus clairement au vu de la description détaillée qui suit, en référence aux dessins annexés parmi lesquels :

30 - la figure 1 présente sous forme schématique l'effet d'une ablation laser de matériau à partir d'un débris dans l'espace ;

- la figure 2 est un ordinogramme d'un procédé de modification de la quantité de mouvement d'un solide dans l'espace ;

- la figure 3 illustre les impulsions émises par un système laser mettant en œuvre le procédé illustré par la figure 2 ; et
- la figure 4 illustre sous forme schématique un satellite comprenant un système utilisable pour mettre en œuvre le procédé illustré par la figure 2.

5 Dans la suite, les éléments identiques ou ayant la même fonction que ceux de l'art antérieur sont désignés par les mêmes références. Ces éléments ne seront pas décrits plus en détail par souci de concision de la description.

La fig. 2 illustre un procédé 20 de modification de la quantité de mouvement d'un solide dans l'espace, plus particulièrement d'un débris. Comme exposé plus haut, la
10 modification de la quantité de mouvement d'un solide dans l'espace peut faire dévier le solide, notamment le diriger dans l'atmosphère 18. Le solide peut, en variante, être accéléré.

Le procédé 20 comprend une première étape 22 consistant à détecter un solide 10 à irradier. Cette étape peut être passive. La détection passive d'un solide peut se faire par détection de lumière solaire réfléchie dans la partie crépusculaire de l'orbite, là où la Terre
15 connaît une nuit locale et le moyen de détection utilisé ainsi que le solide sont éclairés par le Soleil. Cette détection de lumière solaire réfléchie peut être limitée à un domaine de longueurs d'onde, par ex. au domaine de l'ultraviolet, de façon à éviter toute contamination par les lumières urbaines sur Terre. Un télescope de détection à champ de vision super large peut servir de moyen de détection à cette étape. En guise d'exemple, le télescope peut avoir
20 un champ de vision de $\pm 30^\circ$. Le télescope à large champ de vision peut également avoir une résolution de $0,08^\circ$ et/ou une résolution temporelle de $2,5 \mu s$.

Le procédé 20 comprend ensuite une deuxième étape 24 consistant à assurer le suivi du solide 10 à irradier. Il est proposé de mettre en œuvre cette étape à l'aide d'un laser pulsé combiné et d'un télescope doté d'un champ de vision conforme à la précision de
25 détermination de la détection du solide, correspondant à peu près à la résolution angulaire du télescope de détection. Un train d'impulsions laser est par conséquent transmis au solide où l'angle de faisceau est dilaté par le télescope à hauteur de la précision de la détermination de la position. L'image limitée par la diffraction et le temps d'arrivée du signal permettent de déterminer la position tridimensionnelle du solide (deux angles de position et la distance).

30 Le procédé 20 se poursuit par une étape 26 consistant à irradier le solide avec au moins une impulsion laser de haute intensité 52 (cf. fig. 3) pour provoquer l'ionisation d'une partie du solide jusqu'à un état de plasma. Comme indiqué sur la fig. 3, l'intensité ou la

fluence F_1 de cette impulsion laser de haute intensité 52 est supérieure à une intensité ou fluence de seuil F_0 nécessaire à l'ionisation d'une partie du solide 10. Par exemple, la fluence de l'impulsion laser de haute intensité 52 est supérieure à 1 J pour une impulsion de 100 fs. L'impulsion laser de haute intensité 52 est de très courte durée. Par exemple, la durée de l'impulsion laser de haute intensité 52 est inférieure ou égale à 10 ps, de préférence inférieure ou égale à 1 ps. La quantité d'énergie nécessaire à l'ionisation d'une partie du solide 10 est par conséquent limitée.

On peut noter à ce stade que, si une seule impulsion laser de haute intensité 52 est illustrée sur la fig. 3, le solide 10 peut toutefois, à cette étape, être irradié par plus d'une impulsion laser de haute intensité 52, notamment par au moins deux impulsions laser de haute intensité 52.

Il s'avère particulièrement économique de procéder d'abord à l'ionisation d'une partie du solide par une impulsion très courte dans le but de créer des électrons libres (pour rendre ainsi le milieu absorbant), démarche moins énergivore. L'objet visant à modifier les orbites de solides, par ex. de débris spatiaux, dépend en effet d'un transfert efficace de la quantité de mouvement – la force impulsive imprimée aux petites parties du solide par des impulsions laser. L'efficacité de ce transfert de la quantité de mouvement, ainsi que le rendement énergétique et donc le coût du procédé de désorbitation correspondant, dépendent de l'absorption de l'énergie de l'impulsion par le solide. Un inconvénient est que certaines matières pourront effectivement réfléchir la lumière sans absorber d'énergie ou en n'en absorbant qu'une petite partie. Si une matière est parfaitement réfléchissante, le transfert maximal de la quantité de mouvement est le double de celui du photon dans la mesure où un photon rétrorefléchi possède une quantité de mouvement égale et opposée à celle du photon incident. Un rendement bien supérieur peut être obtenu en cas d'absorption de l'énergie lumineuse. Le fait que des matières différentes pourront présenter des coefficients d'absorption linéaire différents peut compliquer l'élimination des débris du fait de leur variabilité et de leur diversité. Il en résulte une prévisibilité réduite. Il est préférable d'être capable de prévoir le comportement d'un morceau de débris issu d'un tir laser sans connaître pour autant les propriétés de la matière d'un morceau de débris indéterminé. C'est la raison pour laquelle il est avantageux de toujours procéder à l'ionisation de la matière du débris de manière à tirer parti du fait qu'une fois ionisées jusqu'à un état de plasma, toutes les matières

adoptent un comportement très similaire en termes d'absorption. Il est, de fait, avantageux de proposer une solution du type "taille unique" à la réduction et à l'élimination des débris.

Le procédé 20 se poursuit ensuite par une étape 28 consistant à irradier la partie du solide 10 à l'état de plasma par un train 54 d'impulsions laser de faible intensité 56 pour provoquer l'échauffement de la partie du solide 10.

L'intervalle de temps T_1 séparant l'impulsion laser de haute intensité 52 de la première impulsion laser de faible intensité 56 du train 54 est de préférence inférieur à 10 ns, de préférence encore inférieur à 1 ns, de sorte que la partie du solide est toujours à l'état de plasma lorsqu'elle est irradiée par ladite première impulsion de faible intensité 56. Pour la même raison, le train 54 d'impulsions laser de faible intensité 56 a de préférence une durée comprise entre 100 ps et 100 ns.

La fluence F_2 desdites impulsions laser de faible intensité peut être inférieure à 10 J/cm^2 et/ou supérieure à 1 J/cm^2 . En guise d'exemple, le rapport η de la fluence F_2 des impulsions laser de faible intensité 56 sur la fluence F_1 de l'impulsion laser haute intensité 52, $\eta = F_2/F_1$, peut être supérieur à 1/100, de préférence supérieur à 1/10 et/ou inférieur à 1, de préférence inférieur à 1/2.

La fluence F_2 ne doit pas forcément être aussi élevée que la fluence F_1 de l'impulsion laser de haute intensité 52 puisque ces impulsions de faible intensité 56 ont pour rôle d'échauffer la matière du solide 10 et non de l'ioniser. L'ionisation est assurée par l'impulsion laser de haute intensité 52 uniquement. L'énergie de ces impulsions laser de faible intensité 56 peut être ensuite absorbée par la matière du solide à l'état de plasma. Après son absorption, l'énergie des impulsions laser se décompose en plusieurs composantes au sein de la matière du solide 10. Une partie de l'énergie prend la forme d'énergie latente de fusion ou de vaporisation ou d'ionisation. Chacune de ces impulsions laisse toutefois derrière elle une faible quantité de chaleur dans le solide dont l'accumulation provoque le ramollissement du solide et en améliore la ductilité ou la fusion. La chaleur issue d'impulsions précédentes qui s'est accumulée dans le solide finit par provoquer l'ablation de matière ramollie ou fondue, ajoutant de la matière précédemment échauffée mais non éjectée au prochain éjecta.

Un train d'impulsions favorise donc la propagation d'énergie thermique de faible intensité dans la matière dans le but de libérer de la masse, de la séparer du morceau de solide sous forme de particules solides désintégrées ou de gouttelettes liquides, ces deux formes

occasionnant une quantité de mouvement de l'éjecta pour un coût énergétique modeste, en augmentant l'efficacité et le rapport transfert de quantité de mouvement/énergie laser par rapport à une illumination à onde continue du solide par une impulsion laser de longue durée.

Par ailleurs, la matière ablatée – qu'il s'agisse de particules, de gouttelettes
5 liquides, de vapeur ou de plasma – risque fort de perturber l'absorption finale d'énergie laser dans la petite partie de solide. Il est par conséquent préférable d'avoir recours à de courtes impulsions séparées d'un intervalle de temps au cours duquel l'éjecta pourra s'écarter du solide et subir une irradiation plus poussée. Ainsi, chaque impulsion laser de faible intensité
56 peut présenter une durée inférieure ou égale à 100 ps et/ou un intervalle de temps T_2 plus
10 long que 100 ps peut séparer deux impulsions successives 56 du train 54 d'impulsions laser de faible intensité 56. L'intervalle de temps T_2 entre deux impulsions laser de faible intensité 56 successives peut aussi être plus court que 100 ns, de préférence 1 ns, dans le but d'éviter le refroidissement du solide entre deux impulsions laser de faible intensité 56 successives.

Le nombre d'impulsions laser de faible intensité 56 du train 54 peut s'inscrire
15 entre 1 et 100.

L'étape 28 du procédé 20 conduit enfin à l'éjection 30 d'un éjecta à partir du débris 10. Il convient de noter à ce stade que l'éjection de matière à partir du solide peut déjà se produire au cours de l'étape 26.

De préférence, l'au moins une impulsion laser de haute intensité 52 et/ou le train
20 54 d'impulsions laser de faible intensité 56 sont émis dans l'espace dans le but d'éviter l'absorption de l'énergie laser par l'atmosphère. Cela dit, en variante, ces impulsions 52, 56 ou tout au moins certaines d'entre elles peuvent être émises depuis la Terre 12.

Le procédé décrit plus haut est particulièrement avantageux par rapport aux procédés connus :

25 i) l'absorption est réalisée en milieu plasma, et est donc « standardisée » et prévisible ;

ii) le plasma persiste pendant le court instant séparant les impulsions de sorte qu'il n'est pas nécessaire de relancer le claquage diélectrique entre les impulsions – d'où un gain d'efficacité puisque les impulsions laser de faible intensité continuent de connaître une
30 absorption linéaire dans le plasma qui persiste d'une impulsion à l'autre. Ceci implique qu'il est possible d'utiliser des impulsions laser de plus faible intensité, ce qui réduit la température du plasma à la faveur de volumes chauffés plus importants et favorise ainsi le

transfert de la quantité de mouvement pour une énergie donnée des impulsions laser. Les impulsions laser de faible intensité peuvent être établies de manière à optimiser la chaleur subsistant dans le solide, en augmentant ainsi l'ampleur de la fusion et de la libération de masse à température plus basse mais avec une quantité de mouvement plus élevée.

5 iii) le train d'impulsions laser de faible intensité crée peu de panache d'ablation. Cela est dû en partie au fait que les impulsions laser de faible intensité ultrarapides chauffent une couche très mince de matière, en produisant ainsi un gradient de température élevé et donc un fort gradient de pression et un taux plus élevé d'ablation. Cela se traduit aussi par une diminution du temps de pénétration de l'onde de raréfaction d'ablation au travers de la
10 couche mince chauffée. C'est cet effet, autrement dit le découplage hydrodynamique de matière chaude, qui limite en fait l'ampleur de la diffusion de la chaleur vers l'intérieur puisque, à défaut, la chaleur continuerait de se diffuser vers l'intérieur lorsque l'impulsion laser prend fin, quelle que soit la durée de cette impulsion. L'énergie des impulsions et la fréquence de récurrence contribuent ensemble à limiter le panache plasma, en minimisant
15 ainsi ses effets d'écran.

Le procédé évoqué plus haut peut être mis en œuvre à l'aide d'un système 100 servant à modifier la quantité de mouvement d'un solide dans l'espace tel qu'illustré sous forme schématique sur la fig. 4. Comme le montre cette figure, le système 100 comprend essentiellement un système laser 104, plus particulièrement un système laser basé sur un
20 réseau de fibres optiques piloté en phase appelé ICAN. Comme chaque fibre dans ce réseau piloté en phase peut faire l'objet d'une commande individuelle, ce système laser 104 offre un très large éventail de possibilités, notamment un réglage à loisir du diamètre du point d'impact, de la durée des impulsions et de leur taille. Crucialement, il offre également la possibilité de produire des impulsions multiples d'intervalle et d'énergie réglables. Un
25 système laser de ce type est décrit, par ex., dans le document de G. Mourou, D. Hulin et A. Galvanauskas, "The road to High Peak Power and High Average Power Laser: Coherent Amplification Network (CAN)", AIP Conference Proceedings, Third International Conference on Superstrong Fields in Plasmas, vol. 827, Dimitri Batani et Maurizio Lontano, 152-163 (2006). Ce système laser ICAN peut être configuré pour émettre au moins une
30 impulsion laser de haute intensité pour provoquer l'ionisation et créer des électrons libres qui rendront le solide absorbant puis un train d'impulsions laser de faible intensité pour

provoquer l'échauffement de ladite partie du solide et l'éjection d'un éjecta à partir dudit débris.

Le système 100 comprend en outre un moyen de détection 102 destiné à détecter ledit solide 10. Comme évoqué plus haut, ledit moyen de détection 102 peut comprendre, par exemple, un télescope à large champ de vision qui détecte la lumière solaire réfléchie dans la partie crépusculaire de l'orbite là où la Terre connaît une nuit locale et le télescope ainsi que le solide sont éclairés par le Soleil. Un télescope de détection à champ de vision super large peut être utilisé. En guise d'exemple, le télescope peut avoir un champ de vision de $\pm 30^\circ$. Le télescope à large champ de vision peut également avoir une résolution de $0,08^\circ$ et/ou une résolution temporelle de $2,5 \mu\text{s}$. Le moyen de détection 102 peut comprendre en outre un filtre passe-bande servant à limiter la détection de la lumière solaire à un domaine de longueurs d'onde, par ex. au domaine de l'ultraviolet, de façon à éviter toute contamination par les lumières urbaines sur Terre.

Le système 100 peut comprendre en outre un moyen de suivi 106 destiné à assurer le suivi dudit solide 10. Ce moyen de suivi peut comprendre un laser pulsé combiné et un télescope doté d'un champ de vision conforme à la précision de détermination du moyen de détection 102 du solide, correspondant à peu près à la résolution angulaire du télescope de détection. Pour assurer le suivi d'un solide, un train d'impulsions laser est envoyé vers le solide, l'angle de faisceau étant dilaté par le télescope à hauteur de la précision de la détermination de la position. L'image limitée par la diffraction et le temps d'arrivée du signal permettent de déterminer la position tridimensionnelle du solide (deux angles de position et la distance).

Le système 100 peut être installé à bord d'un satellite 110 ou d'un engin spatial.

L'invention ne se limite pas aux exemples évoqués plus haut, donnés uniquement à titre d'illustration.

REVENDICATIONS

1. Procédé de modification de la quantité de mouvement d'un solide (10) dans l'espace, plus particulièrement d'un débris (10), comprenant les étapes suivantes :

5 a) Irradiation (26) dudit solide (10) par au moins une impulsion laser de haute intensité (52) pour provoquer l'ionisation d'une partie du solide (10) jusqu'à un état de plasma ; et

b) Irradiation (28) de ladite partie du solide (10) à l'état de plasma par un train (54) d'impulsions laser de faible intensité (56) pour provoquer l'échauffement de ladite
10 partie du solide (10) et l'éjection (30) d'un éjecta (16) à partir dudit solide (10).

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la fluence (F_1) de ladite impulsion laser de haute intensité (52) est supérieure à 10 fois la fluence (F_2) desdites impulsions laser de faible intensité (56), de préférence à 100 fois la fluence (F_2) desdites impulsions laser de faible intensité (56).

15 3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la durée de ladite impulsion laser de haute intensité (52) est inférieure ou égale à 10 ps, de préférence inférieure ou égale à 1 ps.

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel, à l'étape a), le solide (10) est irradié par au moins deux impulsions laser de haute intensité (52).

20 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel chaque impulsion laser de faible intensité (56) a une durée inférieure ou égale à 1 ns et/ou supérieure ou égale à 10 ps.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel deux impulsions (56) successives dudit train (54) d'impulsions laser de faible intensité (56) sont
25 séparées d'un intervalle de temps (T_2) plus long que 100 ps et/ou plus court que 10 ns, de préférence 1 ns, lequel train (54) d'impulsions laser de faible intensité (56) dure de préférence moins de 100 ns, de préférence encore moins de 10 ns.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel le rapport (η) de la fluence (F_2) des impulsions laser de faible intensité (56) sur la fluence (F_1)
30 de l'impulsion laser haute intensité (52) est supérieur à 1/100, de préférence inférieur à 1/2.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, comprenant en outre une étape i) de détection (22) d'un solide (10) à irradier, laquelle étape i) se produit avant l'étape a).

5 9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, comprenant en outre une étape ii) de suivi (24) d'un solide (10) à irradier, laquelle étape ii) se produit avant l'étape a) et après l'étape i), le cas échéant.

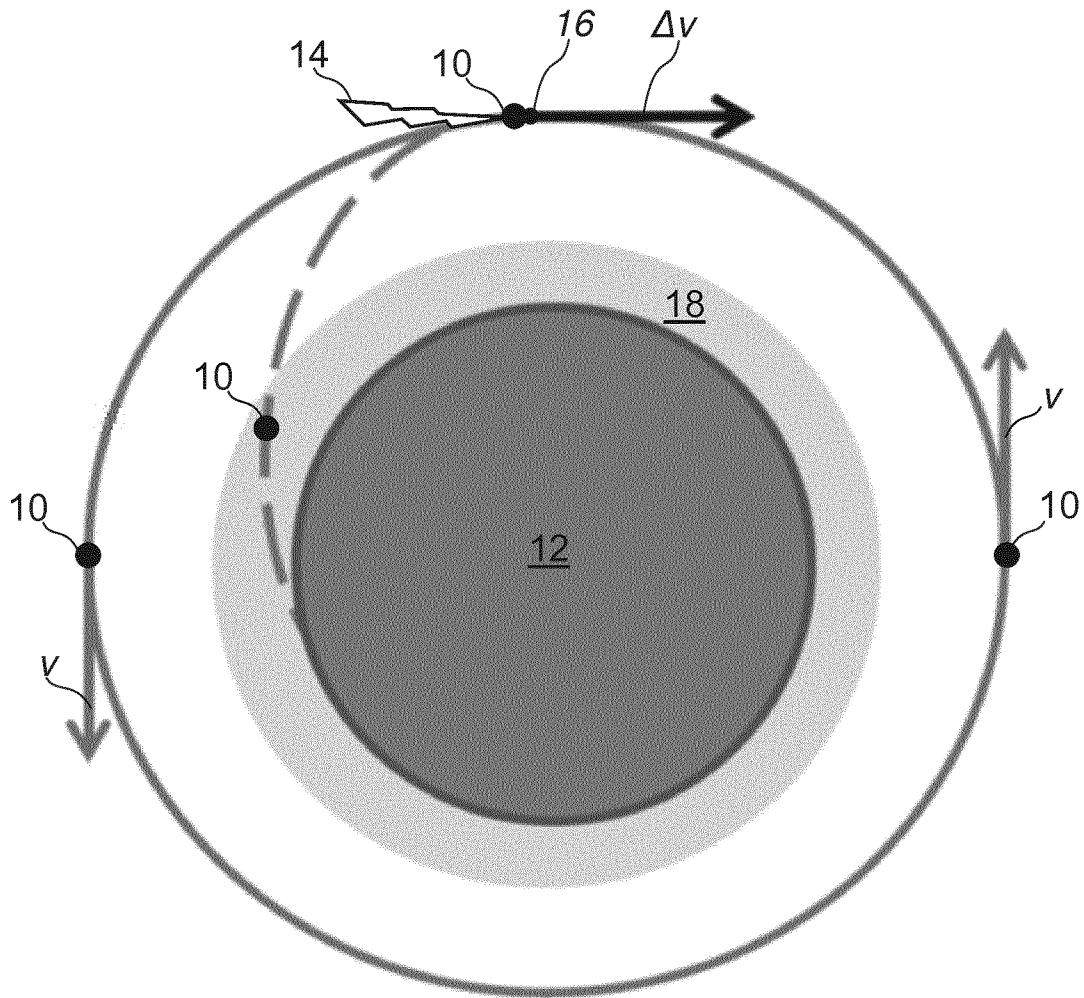
10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel ladite au moins une impulsion laser de haute intensité (52) et/ou ledit train (54) d'impulsions laser de faible intensité (56) sont émis depuis l'espace.

10 11. Système de modification de la quantité de mouvement d'un solide (10) dans l'espace, plus particulièrement d'un débris (10), comprenant un système laser (104), plus particulièrement un système laser ICAN (10), utilisable pour émettre au moins une impulsion laser de haute intensité (52) pour provoquer l'ionisation d'une partie du solide (10) jusqu'à un état de plasma puis un train (54) d'impulsions laser de faible intensité (56) pour provoquer
15 l'échauffement de ladite partie du solide (10) et l'éjection d'un éjecta (16) à partir dudit solide (10).

12. Système selon la revendication 11, comprenant en outre un moyen de détection (102) destiné à détecter ledit solide (10).

20 13. Système selon la revendication 11 ou 12, comprenant en outre un moyen de suivi (104) destiné à assurer le suivi dudit solide (10).

14. Satellite (110) ou engin spatial comprenant un système selon l'une des revendications 11 à 13.

Fig. 1

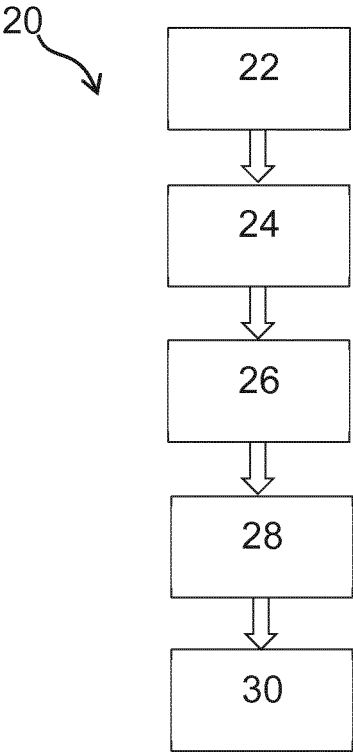


Fig. 2

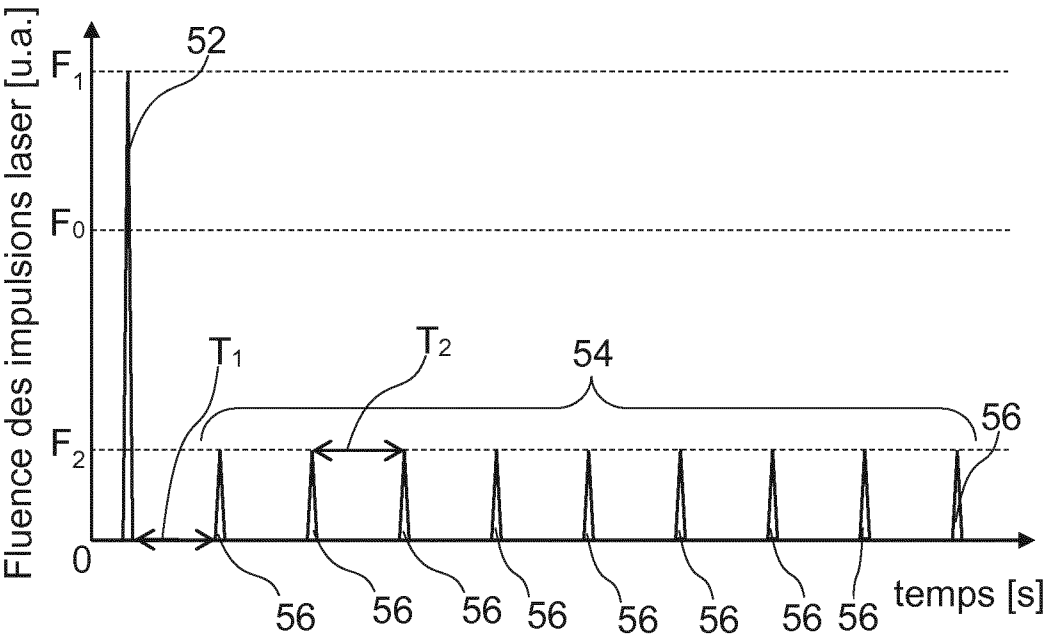
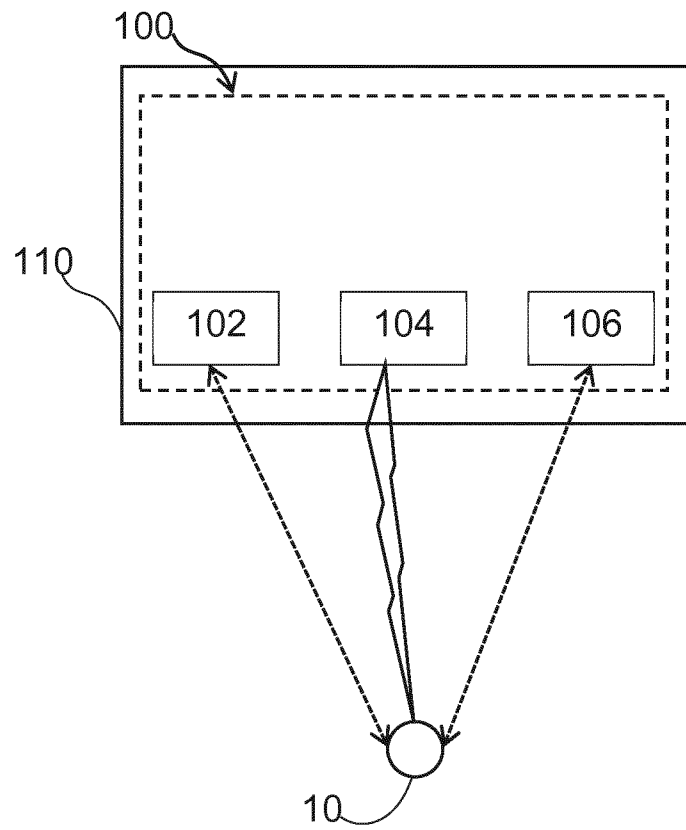


Fig. 3

Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2017/063729

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. B64G1/56 B64G1/68
 ADD.

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)
 B64G G01S

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 practicable, 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.
X	US 2006/256318 A1 (CURTIN MARK S [US]) 16 November 2006 (2006-11-16) page 3, paragraph 25 - page 4, paragraph 31; figures 1-6	1-14
X	FR 2 656 587 A1 (DEUTSCHE FORSCHUNGSANSTALT LUFT [DE]) 5 July 1991 (1991-07-05) page 2, line 27 - page 3, line 14 page 3, line 32 - page 4, line 10 page 4, line 25 - page 5, line 17 page 5, line 33 - page 6, line 4 page 7, line 21 - line 32 page 9, line 27 - line 35 page 11, line 11 - page 14, line 24; figures 1-3	1-14



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"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)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"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

"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

"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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

23 August 2017

Date of mailing of the international search report

04/09/2017

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Hofmann, Udo

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2017/063729

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	TOSHIKAZU EBISUZAKI ET AL: "Demonstration designs for the remediation of space debris from the International Space Station", ACTA ASTRONAUTICA, vol. 112, 13 March 2015 (2015-03-13), pages 102-113, XP055366862, GB ISSN: 0094-5765, DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.03.004 the whole document -----	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/063729

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2006256318	A1	16-11-2006	NONE

FR 2656587	A1	05-07-1991	DE 3943374 A1 04-07-1991
			FR 2656587 A1 05-07-1991
			US 5153407 A 06-10-1992

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2017/063729

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. B64G1/56 B64G1/68 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) B64G G01S		
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
X	US 2006/256318 A1 (CURTIN MARK S [US]) 16 novembre 2006 (2006-11-16) page 3, alinéa 25 - page 4, alinéa 31; figures 1-6 -----	1-14
X	FR 2 656 587 A1 (DEUTSCHE FORSCHUNGSANSTALT LUFT [DE]) 5 juillet 1991 (1991-07-05) page 2, ligne 27 - page 3, ligne 14 page 3, ligne 32 - page 4, ligne 10 page 4, ligne 25 - page 5, ligne 17 page 5, ligne 33 - page 6, ligne 4 page 7, ligne 21 - ligne 32 page 9, ligne 27 - ligne 35 page 11, ligne 11 - page 14, ligne 24; figures 1-3 ----- -/--	1-14
☒ 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 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 23 août 2017		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 04/09/2017
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 Hofmann, Udo

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	TOSHIKAZU EBISUZAKI ET AL: "Demonstration designs for the remediation of space debris from the International Space Station", ACTA ASTRONAUTICA, vol. 112, 13 mars 2015 (2015-03-13), pages 102-113, XP055366862, GB ISSN: 0094-5765, DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.03.004 le document en entier -----	1-14

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2017/063729

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2006256318	A1	16-11-2006	AUCUN	

FR 2656587	A1	05-07-1991	DE 3943374 A1	04-07-1991
			FR 2656587 A1	05-07-1991
			US 5153407 A	06-10-1992
