



(51) Classification internationale des brevets :
H05H 1/52 (2006.01) H01J 27/02 (2006.01)
F03H 1/00 (2006.01) H01J 37/08 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2016/053052

(22) Date de dépôt international :
22 novembre 2016 (22.11.2016)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1561271 23 novembre 2015 (23.11.2015) FR

(71) Déposants : CENTRE NATIONAL DE LA RE-
CHERCHE SCIENTIFIQUE - CNRS - [FR/FR]; 3 rue
Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16 (FR). UNIVERSITÉ
D'ORLÉANS [FR/FR]; Château de La Source, Avenue du
Parc Floral, BP 6749, 45067 Orléans Cedex 2 (FR).

(72) Inventeurs : GIBERT, Titaina; 14 rue François Blache,
41600 Lamotte-Beuvron (FR). DIOP, Fatou; 9 rue de Lu-
goj, 45100 Orléans (FR). BOUCHOULE, André; 60 rue
des Cireries, 45160 Olivet (FR).

(74) Mandataire : NOVAGRAAF TECHNOLOGIES; Bâti-
ment O2, 2 rue Sarah Bernhardt, CS90017, 92665 Asniè-
res-sur-Seine Cedex (FR).

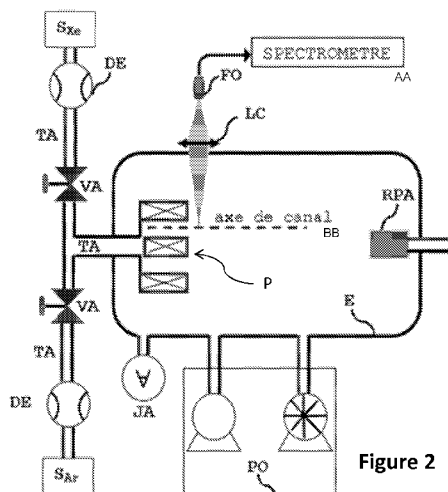
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, 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, 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), eurasien (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).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR IONISING ARGON

(54) Titre : PROCÉDÉ D'IONISATION D'ARGON



AA SPECTROMETER
BB channel axis

(57) Abstract : The present invention relates to a method for ionising argon, as well as, in particular, to a propulsion method and a surface treatment method implementing the method of the invention. The present invention also relates to a device for implementing the method of the present invention. In the method for ionising argon of the invention, the argon is ionised in the presence of a gas selected among xenon and/or krypton, the amount of argon by volume being higher than that of the xenon and/or the krypton expressed in normal conditions of temperature and pressure. The device of the present invention includes the following elements: an ionisation chamber (P, CH), means for injecting argon (S_{Ar}, DE, TA, VA) into said chamber, means (P, anode, CA) for generating an optionally continuous discharge ionising the argon once injected into said chamber, means (P, CE, CI) for generating a magnetic field, characterised in that it also includes means (S_{Xe}, DE, TA, VA) for injecting xenon and/or krypton into the argon before or after injecting the argon into the ionisation chamber. The present invention can be used, for example, in the field of aerospace, in particular in the field of plasma propulsion, as well as in many other fields in which the ionisation of argon is used, in particular in the field of surface treatments, for example in optics and electronics.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

**Publiée :**

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

La présente invention se rapporte à un procédé d'ionisation d'argon, ainsi que, notamment, à un procédé de propulsion et à un procédé de traitement de surface mettant en œuvre le procédé de l'invention. La présente invention se rapporte également à un dispositif de mise en œuvre du procédé de la présente invention. Dans le procédé d'ionisation de l'argon de l'invention, l'argon est ionisé en présence d'un gaz choisi parmi le xénon et/ou le krypton, la quantité en volume d'argon étant supérieure à celle du xénon et/ou du krypton exprimées dans les conditions normales de température et de pression. Dans le dispositif de la présente invention, on trouve les éléments suivants: une chambre d'ionisation (P, CH), des moyens d'introduction d'argon (S_{Ar} , DE, TA, VA) à l'intérieur de ladite chambre, des moyens (P, anode, CA) de génération d'une décharge continue ou non ionisant l'argon une fois introduit dans ladite chambre, des moyens (P, CE, CI) de génération d'un champ magnétique, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens (S_{Xe} , DE, TA, VA) d'introduction de xénon et/ou le krypton dans l'argon avant ou après l'introduction de l'argon dans la chambre d'ionisation. La présente invention trouve par exemple des applications dans le domaine de l'aérospatial, en particulier dans le domaine de la propulsion plasma, ainsi que dans de nombreux autres domaines où l'ionisation de l'argon est utilisée, notamment dans le domaine des traitements de surface, par exemple en optique et en électronique.

PROCÉDÉ D'IONISATION D'ARGON

Domaine technique

La présente invention se rapporte à un procédé d'ionisation
5 d'argon, ainsi que, notamment, à un procédé de propulsion et à un procédé
de traitement de surface mettant en œuvre le procédé de l'invention. La
présente invention se rapporte également à un dispositif de mise en œuvre
du procédé de la présente invention.

La présente invention trouve par exemple des applications dans
10 le domaine de l'aérospatial, en particulier dans le domaine de la propulsion
plasma, ainsi que dans de nombreux autres domaines où l'ionisation de
l'argon est utilisée, notamment dans le domaine des traitements de surface,
par exemple dans le domaine de l'optique, de l'électronique, de la
mécanique, etc.

15 Dans la description ci-dessous, les références entre crochets ([])
renvoient à la liste des références présentées à la fin du texte.

État de la technique

Les plasmas obtenus par décharge électrique dans différents
20 gaz, chimiquement actifs ou non, généralement à basse pression, c'est à
dire inférieure au millième ou millionième de la pression atmosphérique, sont
très utilisés dans de nombreux domaines technologiques. On peut citer à
titre d'exemple le domaine de la microélectronique, notamment les
traitements de modification de surfaces par plasma ayant pour objectif de
25 conférer aux surfaces traitées des propriétés mécaniques, optiques,
tribologiques, biologiques, etc., et le domaine de la propulsion spatiale.

Les espèces créées dans ces plasmas, ions ou radicaux réactifs,
sont utilisées dans toutes ces applications. Dans la plupart des cas les ions
sont impliqués dans les procédés mis en œuvre, avec des accélérations
30 allant de quelques électron-volts à des milliers d'électrons-volts.
L'accélération des ions peut se produire dans une gaine séparant le bord du
plasma et une surface solide pour obtenir un traitement de ladite surface.

Elle peut aussi conduire à un faisceau d'ions transporté en dehors du plasma pour différentes utilisations, parmi lesquelles on peut citer notamment les traitements de surface et la propulsion spatiale, où la quantité de mouvement emportée dans le vide par ce faisceau se traduit par une force de poussée exercée sur le véhicule spatial.

Les satellites ont besoin de disposer de leur propre système de propulsion pour atteindre leur cible orbitale terrestre ou extraterrestre, pour modifier leur trajectoire ou la conserver en fonction de la mission. De nombreux systèmes de propulsion spatiale ont été développés. Ces systèmes de propulsion utilisaient jusqu'ici essentiellement des moyens de propulsion chimiques, par exemple à ergol liquide, à propergol solide ou hybride. Des systèmes futuristes ont été proposés pour des missions extraterrestres utilisant des moyens de propulsion nucléaires, par exemple nucléaire thermique, thermoélectrique, fragment de fusion, antimatière, etc.

Divers systèmes de propulsion électrique faisant appel à des jets d'ions éjectés dans le vide ont fait l'objet de recherches en laboratoire. Ces propulseurs ioniques ou plasmiques permettent d'économiser la masse embarquée en utilisant la force de poussée de jets d'ions, éjectés à des vitesses beaucoup plus grandes que les jets obtenus dans les propulseurs chimiques. Ils font appel à une décharge ionisant les gaz et à divers systèmes d'accélération des ions créés.

Dans ce cadre, on peut citer les propulseurs ioniques ou électromagnétiques, par exemple à effet Hall, les propulseurs à sources d'ions à grilles, les propulseurs magnéto-plasmique à impulsion spécifique variable (VASIMR), et les propulseurs magnétoplasmodynamiques.

Depuis la fin des années 70, des propulseurs à effet Hall ont été mis en œuvre pour des satellites, où l'accélération des ions se fait au sein même du plasma où ils sont créés, ainsi que des propulseurs à grilles, ces dernières assurant l'extraction / accélération des ions déjà créés en amont dans un plasma. Bien que d'autres espèces, par exemple le Césium, aient fait l'objet d'études, comme décrit par exemple dans le document C. O. BROWN and E. A. PINSLEY, "Further experimental investigations of a

cesium hall-current accelerator", AIAA Journal, Vol. 3, No. 5 (1965), pp. 853-859, doi: 10.2514/3.3006 [1], c'est l'utilisation du gaz xénon qui s'est imposée dans ces propulseurs. C'est un gaz chimiquement inerte avec une masse atomique élevée (131 uma) et une ionisation relativement facile, facteurs favorables pour l'utiliser en propulsion spatiale. L'émission de lumière bleu-verte émise par ces propulseurs, caractéristique des ions xénon, traduit leur efficacité d'ionisation.

Après une longue phase de démonstrations, ces propulseurs, et notamment les propulseurs à effet Hall, sont en passe de remplacer la technologie des propulseurs chimiques dans l'industrie des satellites, combinant à la fois fiabilité et économie de masse au lancement.

L'utilisation du xénon est actuellement quasi exclusive dans ces propulseurs. Son approvisionnement fait face à une demande croissante qui ne concerne d'ailleurs pas que le spatial, puisqu'on retrouve l'utilisation du xénon dans les lampes, dans l'électronique, etc. Ce gaz est déjà très cher, et les problématiques liées à sa raréfaction et à des difficultés géopolitiques pour son approvisionnement conduisent à envisager d'autres espèces chimiques ou solutions pour la propulsion spatiale.

Alternativement étudié, l'argon est abondant sur terre et avec un prix de revient environ 400 fois plus faible que celui du xénon. Mais c'est un gaz plus difficilement ionisable que le xénon et l'obtention de bons rendements d'ionisation requiert des puissances électriques qui sont beaucoup plus élevées, ce qui pose un problème matériel et d'économie d'énergie à bord des satellites. L'état actuel de la technique ne propose pas de procédé et/ou de dispositif permettant de faciliter l'ionisation de l'argon et, en conséquence, son utilisation n'est pas favorablement envisagée en propulsion spatiale.

Il existe donc un réel besoin de trouver, pour la propulsion, un ergol alternatif au xénon pur ou à l'argon pur, et, en tout cas, de trouver un procédé ou un ergol palliant les limitations et inconvénients rencontrés dans l'état de l'art.

De manière générale, l'argon est utilisé ionisé lorsque la contrainte économique est acceptée, notamment en termes de puissance énergétique consommée et de matériel nécessaire pour son ionisation. C'est le cas par exemple dans les technologies de traitement de surface où cet intérêt de l'argon se combine en plus avec celui d'un bon rendement de pulvérisation lorsqu'un ion argon bombarde une surface.

En outre, des économies d'énergie et de matériel sont toujours les bienvenues quel que soit le domaine technologique, y compris dans le traitement de surface où le coût du traitement impacte directement le coût du produit dont la surface a été traitée.

Description de l'invention

La présente invention répond précisément à ces besoins et aux inconvénients et obstacles de l'art antérieur, notamment ceux précités, en fournissant un procédé d'ionisation d'argon, ledit procédé étant caractérisé en ce que l'argon est ionisé en présence d'un gaz choisi parmi le xénon et/ou le krypton, la quantité en volume d'argon étant supérieure à celle du xénon et/ou du krypton exprimées dans les conditions normales de température et de pression.

La présente invention répond également à ces besoins et aux inconvénients et obstacles de l'art antérieur, notamment ceux précités, en fournissant un procédé de génération d'un plasma comprenant la mise en œuvre du procédé d'ionisation de la présente invention.

Les inventeurs à l'origine de la présente ont en effet constaté de manière inattendue que l'ionisation d'argon, notamment dans une décharge magnétisée, par exemple dans un propulseur à effet Hall, se révèle considérablement renforcée par l'ajout de xénon et/ou de krypton. A titre d'illustration, l'addition de 4% en volume de xénon seulement, exprimé dans les conditions normales de température et de pression, conduit à une augmentation de plus de 50% du courant d'ions total et même au-delà, grâce au procédé de la présente invention. De telles augmentations sont beaucoup plus importantes qu'une simple addition de courant due à

l'ionisation de la quantité minoritaire de xénon et/ou ou de krypton ajoutée. Pour expliquer cette augmentation du courant, les inventeurs ont réalisé des mesures qui, prises séparément ou en combinaison, démontrent que l'augmentation du courant de décharge et du courant d'ions est due à un
5 renforcement de l'ionisation de l'argon. Cette efficacité du procédé de la présente invention est par ailleurs clairement confirmée par d'autres données expérimentales relatives aux émissions lumineuses des ions argon lors de la mise en œuvre du procédé de l'invention. Les exemples présentés ci-dessous montrent de nombreux résultats expérimentaux remarquables
10 obtenus par les inventeurs, illustrant l'efficacité du procédé de la présente invention.

L'intérêt économique de la présente invention est très important, l'argon coûtant environ 400 fois moins cher que le xénon. La présente invention permet donc de réduire fortement le coût des procédés d'ionisation
15 de l'art antérieur où le xénon ou l'argon étaient utilisés seuls, par exemple pour la propulsion spatiale ou pour les technologies de traitement de surface.

Les résultats obtenus grâce au procédé de l'invention sont d'autant plus surprenants qu'ils se manifestent avec de très petites quantités
20 de xénon et/ou de krypton, et l'intérêt économique de l'invention réside dans le fait que le xénon peut, grâce à la présente invention, être ajouté à l'argon sans transformation notable du matériel technologique utilisé pour l'ionisation. En quelque sorte, les qualités physiques d'ionisation du xénon sont « transmises » à l'argon grâce au procédé de la présente invention.

25 La présente invention présente un intérêt économique en ce que l'argon peut être le gaz majoritaire dans des procédés d'ionisation qui nécessitaient par exemple du xénon et/ou du krypton pur. Ainsi, selon l'invention, de préférence et sans s'y limiter, la quantité de xénon et/ou de krypton peut par exemple être inférieure à 20% en volume par rapport au
30 volume total d'argon et du gaz choisi parmi le xénon et/ou le krypton, de préférence inférieure à 15%, de préférence inférieure à 10%, de préférence inférieure à 8%, de préférence de 2 à 8%, de préférence de 2 à 6%, par

exemple de 4%, la quantité étant exprimée en % en volume, par rapport au volume total d'argon et du gaz choisi parmi le xénon et/ou le krypton, dans les conditions normales de température et de pression.

Selon le procédé de l'invention, on peut ajouter le gaz choisi
5 parmi le xénon et/ou krypton à l'argon avant et/ou pendant l'ionisation de l'argon. En effet, les expérimentations montrent que les effets se produisent dès lors que le xénon et /ou le krypton sont présents dans l'argon au moment de son ionisation. Ainsi, selon l'invention, le xénon et/ou le krypton peut (peuvent) donc être ajouté(s) à l'argon avant son ionisation ou alors l'argon
10 peut d'abord être ionisé, puis on ajoute le xénon et / ou le krypton dans l'argon ionisé.

Selon l'invention, l'ionisation d'argon et la génération d'un plasma d'argon peuvent être réalisées par tout moyen connu de l'homme du métier pour ioniser l'argon, notamment en présence d'un champ magnétique. Selon
15 l'invention, l'ionisation peut notamment être réalisée par une décharge électrique dans l'argon et/ou dans le mélange argon et xénon et/ou krypton. Ainsi, selon l'invention, l'ionisation peut être réalisée en présence d'un champ magnétique et d'une décharge électrique, le champ magnétique et la décharge électrique étant utilisés pour l'ionisation et, le cas échéant, pour
20 l'accélération les ions formés.

Selon l'invention, l'ionisation de l'argon peut en particulier être réalisée au moyen d'une source d'ions. Par « source d'ions », on entend notamment tout dispositif connu de l'homme du métier comprenant les éléments permettant d'ioniser un gaz, en particulier de l'argon, et, le cas
25 échéant, d'utiliser le gaz ionisé, par exemple pour de la propulsion ou pour un traitement de surface. Comme exposé ci-dessous, la source d'ions est de préférence choisie en fonction de l'utilisation voulue du gaz ionisé. Quel que soit la mise en œuvre du procédé de l'invention, lorsque l'ionisation de l'argon selon l'invention est réalisée au sein d'une source d'ions, ladite
30 source d'ions peut être par exemple une source de propulseur à effet Hall, une source magnétron ou une source End-Hall, appelée aussi source Kaufmann.

A titre d'exemple, selon l'invention, la source d'ions peut comprendre, de manière générale, une chambre d'ionisation ; des moyens d'introduction de l'argon à l'intérieur de ladite chambre d'ionisation ; des moyens d'introduction de xénon et/ou de krypton dans ladite chambre ; une anode ; des moyens de génération d'une décharge ionisant l'argon une fois introduit dans ladite chambre ; des moyens de génération d'un champ magnétique, et une cathode. Des exemples particuliers de sources d'ions utilisables, y compris des différents éléments qui peuvent les composer, sont présentés dans les références bibliographiques citées ci-dessous dans des exemples d'applications industrielles de la présente invention.

Selon l'invention, lors de la mise en œuvre du procédé de l'invention, le champ magnétique peut être essentiellement radial entraînant l'établissement d'un champ électrique essentiellement axial et une accélération axiale des ions formés. L'accélération axiale des ions formés permet en particulier de mettre en œuvre la présente invention dans des procédés de propulsion, par exemple de propulsion spatiale, par exemple comme décrit dans les documents D.Goebel, I.Katz « fundamentals of electric propulsion and Hall thrusters », Wiley book, 2008 [2], A.Leufroy, T.Gibert, A.Bouchoule, « Characteristic of a permanent magnet low power thruster », 21eme IEPC, Ann. Arbor Michigan, sept 2009 [3], et WO2009016264, M.Guyot, « Hall effect ion ejection device » [4], ou dans des procédés de traitement de surface, par exemple comme décrit dans les documents H.R.Kaufman, R.S.Robinson, R.I.Seddin, « End hall ion source », J.Vac.sci.technology, A5(4), july/august 198 [5], WO2002011195, « Method for depositing a fluorine-doped silica film », Essilor [6] et WO1999058737, Kaufman et Robinson, « Apparatus for sputter deposition » [7].

Ainsi, la présente invention se rapporte également à un procédé de propulsion comprenant la mise en œuvre du procédé d'ionisation de l'invention. Dans ce cadre, lorsque l'ionisation de l'argon est réalisée au sein d'une source d'ions, ladite source d'ions peut par exemple être un propulseur spatial à effet Hall, par exemple tel que ceux décrits dans les

documents [2], [3] et [4]. Dans ce cadre, la cathode peut être située à l'extérieur de la source d'ions.

La présente invention peut s'inscrire plus largement par exemple dans la mise en œuvre de propulsions ioniques ou électromagnétiques, de propulseurs électrodynamiques, par exemple à effet Hall, de propulsion
5 magnéto-plasmique à impulsion spécifique variable (VASIMR), et de propulsions magnétoplasmodynamique utilisant la force de Lorentz (« LFA » pour « Lorentz Force Accelerator »), par exemple un propulseur magnétoplasmodynamique, par exemple celui décrit par la NASA dans le
10 document Magnetoplasmodynamic Thrusters sur le site internet <http://www.nasa.gov/centers/glenn/about/fs22grc.html>, qu'il s'agisse d'un propulseur à champ induit, d'un propulseur dynamique magnétoplasmatique à champ propre (« MPD » ou « SF-MPDT » pour « Self-Field MagnetoPlasmaDynamic Thruster »), ou d'un propulseur dynamique
15 magnétoplasmatique à champ appliqué (« AF-MPDT » pour « Applied-Field MagnetoPlasmaDynamic Thruster »).

A titre d'exemple, on peut citer un propulseur magnétoplasmodynamique, tel que décrit dans le document F. Paganucci et al., « Performance of an Applied Field MPD Thruster », Presented as Paper
20 IEPC-01-132 at the 27th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, 15-19 October, 2001, Published by the Electric Propulsion Society [8]. Dans ce dispositif, le propulseur se compose d'une tuyère divergente munie d'électrodes : la cathode au centre de la tuyère et suivant l'axe de la tuyère, et l'anode, circulaire, est placée sur le pourtour de la
25 tuyère. En mode de fonctionnement, si l'on met en œuvre le procédé de la présente invention, l'argon majoritaire comprenant du xénon et/ou du krypton est injecté à la base de la tige centrale et un arc électrique de plusieurs milliers d'ampères est émis axialement depuis la cathode. L'argon est ionisé, en présence du xénon et/ou du krypton, pour former un plasma.
30 Le courant électrique axial induit autour de lui un champ magnétique radial puissant, avec une maximale au niveau de l'axe, là où la densité de courant est la plus forte. Le courant électrique évolue alors radialement vers l'anode

en sortie de la tuyère où il interagit avec le champ magnétique, en produisant une force propulsive, dite de Lorentz, dirigées suivant l'axe de la tuyère. Le plasma d'argon généré selon le procédé de l'invention est alors accéléré électromagnétiquement à travers la sortie de la tuyère, en produisant une poussée qui permet la propulsion, notamment d'un véhicule spatial.

La présente invention se rapporte également à un procédé de traitement de surface comprenant la mise en œuvre du procédé d'ionisation de l'invention. Au sens de la présente invention, on entend par « traitement de surface » tout traitement consistant à modifier chimiquement et/ou physiquement une surface et/ou à déposer une couche d'un matériau sur une surface, par exemple comme décrit et documenté ci-dessous.

Ainsi, le procédé de traitement de surface de la présente invention peut être par exemple un procédé de dépôt de couches minces, un procédé de revêtement de surface, un traitement de surface haute performance, un procédé de nettoyage d'une surface, un procédé d'activation d'une surface, un procédé de gravure d'une surface, etc. connu de l'homme du métier, utilisant du xénon ionisé seul ou de l'argon ionisé seul, mais dans lequel, selon l'invention, on remplace avantageusement lorsqu'il s'agit de xénon seul, le xénon par de l'argon dans lequel on ajoute, avant et/ou pendant l'ionisation de l'argon, du xénon et/ou du krypton ; ou dans lequel, lorsqu'il s'agit d'argon seul, on rajoute avantageusement, selon l'invention, avant et/ou pendant l'ionisation de l'argon, du xénon et /ou du krypton.

La présente invention s'adresse donc à tout procédé industriel mettant en œuvre un plasma d'argon suivant lequel on ajoute avantageusement, selon l'invention, du xénon et/ou du krypton ; ou un plasma de xénon en remplaçant avantageusement ce dernier par de l'argon dans un procédé selon la présente invention.

On peut citer à titre d'exemples de procédés dans lesquels la présente invention peut être appliquée :

- Les procédés de dépôt en phase chimique assisté par plasma (PACVD pour « plasma assisted chemical vapor deposition » ou PECVD pour « plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition »), comme ceux décrits par exemple dans le document G.A. Battiston et al., « PECVD of amorphous TiO₂ thin films : effect of growth temperature and plasma gaz composition », Elsevier, Thin Solid Films 371 (2000) 126-131 **[9]**.
- Les procédés de dépôt en phase physique assisté par plasma (PAPVD pour « plasma assisted physical vapor deposition »), comme celui décrit par exemple dans le document John A. Thornton et al., « Plasma-assisted deposition processes : theory, mechanisms and applications », Elsevier Sequoia, Thin Solid Films, General Film Behaviour, 107(1983) 3-19 **[10]**.

On peut citer à titre d'exemple de procédé industriels dans lequel la présente invention peut s'appliquer :

- Dans le domaine métallurgique ou mécanique : dépôt de films protecteurs, isolation, réduction du frottement, protection contre l'usure, solutions pour l'usinage de précision, traitement anticorrosion, métallisation sur isolant, coloration de surface, nettoyage fin avant peinture industrielle, fonctionnalisation pour améliorer la durée de vie des peintures, métallisation de plastiques, métallisation de caoutchoucs, étanchéité des surfaces, tenue aux température, etc.. On peut citer à titre d'exemple les procédés décrits dans le document Dirk Hegemann et al. « Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement », Elsevier, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 208 (2003) 281–286 **[11]**.
- Dans le domaine de l'optique : traitement des verres, traitements antireflets, traitements anti-rayure / anti-usure, traitements de métallisation, fabrication des vitres auto-nettoyantes, fabrication des verres noircissant au soleil, etc.. On peut citer à titre d'exemple les procédés décrits dans les documents M. Charbonnier et al., « Tin-

free electroless metallization of glass substrates using different PACVD surface treatment processes », Elsevier, Surface and Coatings Technology 162 (2002) 19–30 **[12]** ; et Changquan Wang et al., « Preparation of hydrophobic coating on glass surface by dielectric barrier discharge using a 16 kHz power supply », Elsevier, Applied Surface Science 252 (2006) 8348–8351 286 **[13]**.

- Dans le domaine de l'énergie solaire : dépôt de couches minces pour la fabrication de cellules solaires, élaboration des miroirs solaires, protection contre les environnements agressifs, etc. On peut citer à titre d'exemple les procédés décrits dans le document Jan Schmidt, « Surface passivation of silicon solar cells using plasma-enhanced chemical-vapour-deposited SiN films and thin thermal SiO₂/plasma SiN stacks », Institute of Physics Publishing, Semiconductor Science and Technology, Semicond. Sci. Techn. 16 (2001) 164-170, www.iop.org/journal/ss PII:S0268-1242(01)17198-1 **[14]**.

- Dans le domaine du textile : imperméabilisation, traitement contre la chaleur, nettoyage, etc.. On peut citer à titre d'exemple les procédés décrits dans le document R. Morent et al., « Non-thermal plasma treatment of textiles », Elsevier, Surface & Coatings Technology 202 (2008) 3427–3449 **[15]**.

- Dans le domaine agro-alimentaire, notamment pour les emballages alimentaires : dépôt de couches anti-bactériennes, protection contre l'oxydation, accroissement des dates limites de consommation (DLC), etc.. On peut citer à titre d'exemple les procédés décrits dans le document Michael Deilmann et al., « Permeation mechanisms of pulsed microwave plasma deposited silicon oxide films for food packaging applications », Journal of Physics D : Applied Physics, J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 135207 (7pp) **[16]**.

Selon l'invention, dans le traitement de surface, lors de la mise en œuvre du procédé de l'invention, le champ magnétique peut être préférentiellement axial et la décharge peut être alimentée par une source

électrique continue, à l'exemple de la source d'ions utilisée en traitement de surfaces et/ou dépôt de couches de minces, connue de l'homme de l'art sous le nom de source END-HALL, par exemple comme décrit dans les documents [5], [6], [7], WO2000005742 [17], et WO2005024086 [18]. Dans ce cadre, la cathode peut être située à l'intérieur de la source d'ions. Par exemple, selon l'invention, le champ magnétique peut être par exemple parallèle à la surface à traiter et la décharge peut être une décharge continue ou non. Selon l'invention, l'ionisation de l'argon est par exemple obtenue dans une chambre d'ionisation magnétisée, et les ions argon sont accélérés vers ladite surface à traiter, placée dans ladite chambre ou à l'extérieur de celle-ci. Ladite surface est alors appelée cathode magnétron, et ladite décharge appelée décharge magnétron à l'exemple des dispositifs, appelés sources magnétrons, utilisables pour le dépôt des couches minces selon l'invention, décrits par exemple dans les documents [19], [20] et [21].

Ainsi, selon l'invention, l'ionisation de l'argon peut être réalisée au moyen d'une source d'ions qui peut être par exemple une source magnétron ou une source End-Hall.

Le renforcement de l'ionisation de l'argon et/ou des propriétés physiques du jet d'argon ionisé selon l'invention permet ainsi d'améliorer les procédés existants dans l'industrie, en les rendant plus économiques et performants, sans modification majeure des installations existantes. En effet, grâce à la présente invention, un réservoir de xénon, un conduit et une vanne permettant d'injecter du xénon et/ou du krypton dans l'argon avant ou pendant son ionisation, éventuellement un dispositif de contrôle et de régulation de l'injection du xénon et/ou du krypton dans l'argon, suffisent à améliorer remarquablement l'efficacité d'ionisation de l'argon. Egalement, un mélange d'argon et de « xénon et/ou de krypton » où l'argon est majoritaire selon l'invention peut être stoké dans un réservoir unique alimentant le procédé de la présente invention lors de sa mise en œuvre, par exemple dans une source d'ions, et conduit au résultat d'amélioration remarquable de l'ionisation obtenue, sans modification d'un dispositif pré-existant et/ou, potentiellement, sans dispositif auxiliaire.

Ainsi, la présente invention se rapporte également à un dispositif d'ionisation d'argon comprenant :

- une chambre d'ionisation,
- des moyens d'introduction d'argon à l'intérieur de ladite chambre,
- 5 - des moyens de génération d'une décharge continue ou non ionisant l'argon une fois introduit dans ladite chambre,
- des moyens de génération d'un champ magnétique,

ledit dispositif comprenant en outre un moyen d'introduction de xénon et/ou le krypton dans l'argon avant ou après l'introduction de l'argon dans la
10 chambre d'ionisation.

Selon l'invention, le dispositif peut comprendre en outre des moyens de génération d'un champ magnétique dans ladite chambre. Il peut s'agir par exemple de l'un des moyens décrits dans les documents **[2]** à **[21]**, et Fatou Diop, « Sources de particules neutres monocinétiques : diagnostics
15 spécifiques et étude physique d'une source de Hall en plasma d'argon ou en mixture xénon-argon », thèse soutenue le 22 juillet 2015, Université d'Orléans **[22]**.

Selon l'invention, les moyens de génération d'une décharge peuvent être par exemple des moyens tels que ceux décrits dans les
20 documents **[2]** à **[22]**. La décharge peut être continue ou alternative.

Selon l'invention, le dispositif peut comprendre en outre une enceinte à vide, la chambre d'ionisation étant placée dans ladite enceinte, l'enceinte étant dotée d'un système de pompage permettant d'atteindre la pression souhaitée dans l'enceinte, et donc dans la chambre d'ionisation.

25 Egalement, la présente invention se rapporte à l'utilisation d'un dispositif d'ionisation d'argon, tel que défini dans la présente, pour la mise en œuvre du procédé d'ionisation selon l'invention, utilisation dans laquelle le xénon et/ou le krypton sont introduit(s) dans l'argon avant et/ou pendant l'ionisation de l'argon dans la chambre d'ionisation.

30 Selon l'invention, la chambre d'ionisation utilisable pour la mise en œuvre de la présente invention peut être choisie parmi celles connues de l'homme du métier, le choix étant réalisé en fonction de l'application à

laquelle est destinée l'ionisation de l'argon. Par exemple, pour la propulsion spatiale, on peut utiliser une chambre d'ionisation telle que décrite dans le document Alain Leufroy, « Micropropulsion et diagnostics pour la propulsion spatiale », thèse soutenue le 15/02/2010, Université d'Orléans [23]. Par exemple, pour du traitement de surface, on peut utiliser une chambre d'ionisation telle que décrite dans les documents [5] et [19].

Selon l'invention, les moyens d'introduction d'argon à l'intérieur de ladite chambre peuvent comprendre par exemple un réservoir d'argon, ainsi qu'un conduit reliant ledit réservoir à la chambre d'ionisation. De préférence, le conduit est muni d'une vanne, le cas échéant automatique, et d'un moyen de contrôle et/ou de commande permettant d'injecter l'argon dans la chambre d'ionisation. Ces moyens sont à titre d'exemple ceux décrits dans les documents précités, notamment dans le document [6].

Selon l'invention, les moyens de génération d'une décharge continue ou alternative ionisant l'argon une fois introduit dans la chambre d'ions peuvent être par exemple ceux décrits dans les documents cités [2] à [22].

Selon l'invention, les moyens de génération d'un champ magnétique peuvent être par exemple ceux précités dans les documents cités [2] à [22].

Les moyens d'introduction de xénon et/ou de krypton dans l'argon avant ou après l'introduction de l'argon dans la chambre d'ionisation peuvent être tout moyen connu de l'homme du métier pour l'introduction d'un gaz dans un conduit menant à une chambre d'ionisation et/ou dans une chambre d'ionisation. Ces moyens peuvent comprendre par exemple un réservoir de xénon et/ou de krypton, ainsi qu'un conduit reliant ledit réservoir à la chambre d'ionisation de manière à injecter le xénon et/ou le krypton dans la chambre d'ionisation où l'argon est injecté pour son ionisation ou à un conduit d'injection d'argon dans la chambre d'ionisation, de manière à injecter le xénon et/ou le krypton dans l'argon avant que ce dernier ne soit introduit dans la chambre d'ionisation. De préférence, le conduit est muni d'une vanne, le cas échéant automatique, et de moyen de contrôle et de

commande permettant d'injecter le xénon et/ou le krypton directement dans la chambre d'ionisation ou dans le conduit d'injection de l'argon dans la chambre d'ionisation. Ces moyens sont à titre d'exemple ceux d'injection de gaz décrit dans les documents précités.

5 Selon l'invention, le dispositif peut également comprendre un réservoir unique dans lequel le mélange d'argon à ioniser et de xénon et/ou de krypton a été introduit, de manière à n'avoir qu'un conduit d'injection de gaz dans la chambre d'ionisation pour la mise en œuvre du procédé de la présente invention.

10 Selon l'invention, le dispositif peut également comprendre un moyen de transfert thermique assurant un refroidissement de la chambre d'ionisation, par exemple un moyen contrôlé de refroidissement de la chambre d'ionisation. Il peut s'agir à titre d'exemple d'un système de refroidissement, par exemple tel que celui représenté sur la figure 8 annexée
15 et dans l'exemple correspondant ci-dessous. Ce moyen permet avantageusement de refroidir le moteur par contact thermique, par exemple au moyen d'une circulation d'eau dont la température d'entrée est asservie à une consigne.

 Selon l'invention, pour la mise en œuvre du procédé / dispositif
20 de la présente invention, on peut, à titre d'exemple, introduire dans un premier temps, dans une chambre d'ionisation, un flux d'argon, on met en œuvre lesdits moyens pour générer une décharge ionisant l'argon et obtenir ainsi un plasma d'argon dans ladite chambre d'ionisation, puis on introduit à l'intérieur la chambre d'ionisation du xénon et/ou du krypton, dans une
25 proportion conforme à la présente invention. Dans ce cas, le procédé de l'invention consiste dans un premier temps à générer un plasma d'argon dans une source d'ions, puis dans un deuxième temps à injecter un flux de xénon et/ou de krypton dans ladite source d'ions.

 Selon l'invention, on peut également, à titre d'exemple, introduire
30 ensemble le mélange d'argon et de xénon et/ou de krypton dans la source d'ion et mettre en œuvre l'ionisation, le mélange d'argon et de xénon et/ou

krypton étant préparé d'avance ou juste avant son introduction dans la source d'ion.

D'autres avantages pourront encore apparaître à l'homme du métier à la lecture des exemples présentés ci-dessous, illustrés par les figures annexées, donnés à titre illustratif.

Brève description des figures

- La figure 1 représente schématiquement une vue en coupe d'un exemple de propulseur à effet Hall dans lequel le procédé de la présente invention peut être mis en œuvre.
- La figure 2 représente schématiquement un dispositif comprenant une enceinte à vide au sein de laquelle le dispositif schématisé sur la figure 1 peut être placé pour une mise en œuvre sous vide ou vide partiel.
- La figure 3 représente un diagramme comparatif montrant l'évolution de la densité de courant de décharge (exprimé en Ampères) en fonction du débit total de gaz pour de l'argon pur selon l'art antérieur, et pour un débit constant d'argon en rajoutant du xénon selon l'invention, les débits étant exprimés en centimètre cube par minute dans les Conditions Normales de Température et de Pression (CNETP) (Unité : « $\text{cm}^3.\text{min}^{-1}$ » ou « sccm », CNETP : 273°K, 101325 Pa).
- La figure 4 représente un diagramme comparatif montrant l'évolution la densité du courant d'ions (exprimée en unité arbitraire) sur l'axe du moteur de l'exemple 1, en fonction du débit total de gaz pour de l'argon pur selon l'art antérieur, et pour un débit constant d'argon en rajoutant du xénon selon l'invention. Les débits sont exprimés en centimètre cube par minute dans les Conditions Normales de Température et de Pression (CNETP) (Unité : « $\text{cm}^3.\text{min}^{-1}$ » ou « sccm », CNETP : 273°K, 101325 Pa).
- La figure 5 représente un diagramme comparatif montrant l'évolution de la densité du courant d'ions (Intensité u.a.) en fonction de l'angle (Angle (°), par rapport à l'axe du moteur) dans le cas de l'argon pur

selon l'art antérieur, et dans le cas d'un mélange argon-xénon selon l'invention.

- Les figures 6a et 6b représentent deux diagrammes représentant l'évolution de l'intensité des raies émises par les ions argon pour un plasma d'argon pur selon l'art antérieur (Ar pur) ; pour un plasma de xénon pur selon l'art antérieur (Xe pur) ; et pour différentes quantités de xénon ajoutées à au plasma d'argon selon la présente invention (Ar + 0,5 sccm Xe ; Ar + 1 sccm Xe ; Ar + 1,5 sccm Xe ; et Ar + 2 sccm Xe, avec 1 sccm de Xe = 4,2% de Xe en volume par rapport au volume total argon + xénon, exprimé dans les Conditions Normales de Température et de Pression (CNTP)).
- La figure 7 représente un schéma détaillé d'un exemple de dispositif permettant la mise en œuvre du procédé de la présente invention.
- La figure 8 représente un schéma d'un circuit de refroidissement utilisé lors des expérimentations avec le dispositif représenté sur la figure 7.
- La figure 9 représente l'évolution de la température du dispositif de la présente invention schématisé sur la figure 7, en fonction du temps de fonctionnement suivant deux systèmes de refroidissement (C1 et C2) présenté dans les exemples ci-dessous. En ordonnée est représentée la température du moteur (TM) en °C, et en abscisse le temps (t) de fonctionnement du moteur en minutes.
- La figure 10 représente l'évolution de la température du moteur et du courant de décharge en fonction du temps de fonctionnement. En ordonnée à gauche est représenté le courant de décharge moyen (CDM) en A (Ampères), en ordonnée à droite est représenté la température du moteur (TM) en °C, et en abscisse le temps (t) de fonctionnement du moteur en minutes.
- La figure 11 représente l'évolution du courant d'ions collecteur sur l'axe en fonction du potentiel de répulsion du RPA (VRPA) pour différentes conditions de décharge et une tension de décharge $U_d = 220$ V lors de la mise en œuvre du procédé de la présente invention. En ordonnée est représenté le courant d'ions collecteur moyen (CIM) en unité

arbitraires (u.a.), et en abscisse la tension de répulsion (V) (TR) en V (Volts).

- La figure 12 représente l'évolution du courant de décharge et du courant collecteur d'ions sur l'axe du jet en fonction du débit total lors de la mise en œuvre du procédé de la présente invention avec un mélange Ar + Kr. En ordonnée à gauche est représenté le courant de décharge (CD) en ampères (A), à droite le courant d'ions (CI) en unités arbitraires (u.a.) et en abscisse le débit total Ar+Kr (sccm).

EXEMPLES

Exemple 1 : Exemple de dispositif pour la mise en œuvre de la présente invention

Dans cet exemple, nous présentons un exemple de dispositif dans lequel l'ionisation de l'argon selon le procédé de l'invention a été mis en oeuvre. Le dispositif est une source d'ions, qui est le propulseur plasmatique à effet Hall décrit dans le document FR 2 842 261, « Propulseur plasmique a effet hall », Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) [24].

Ce dispositif est schématisé sur les figures 1 et 2 annexées. Sur ces figures, le propulseur (P) comprend un canal annulaire délimité par une céramique externe (CE) et une céramique interne (CI) formant une chambre d'ionisation (CH) et d'accélération, dans laquelle sont introduits les gaz ionisables. Ce canal annulaire est ouvert (O) à son extrémité. Le propulseur comprend une anode (anode), et une cathode (CA) (source d'électrons) placée à l'extérieur de la sortie (O) du canal ; et un circuit magnétique (CM) pour créer un champ magnétique dans une partie du canal annulaire. Le circuit magnétique est disposé de manière à ce que le champ magnétique maximum généré dans le canal soit essentiellement radial.

Le propulseur est placé dans une enceinte (E) sous vide comme schématisé sur la figure 2 annexée. Cette enceinte (E) est reliée à un système de pompage (PO). Le propulseur est relié à une source d'alimentation en argon (S_{Ar}) et une source d'alimentation en xénon (S_{Xe}),

par un système de tubes d'alimentation (TA). Ce système de tubes comporte une vanne (VA) permettant de manière sélective de permettre l'introduction de l'argon, du xénon ou les deux, dans le propulseur (P), plus précisément dans la chambre d'ionisation (CH). Le débit de chaque gaz peut être réglé
5 manuellement directement au niveau de la source d'alimentation au moyen des vannes (VA).

Des débitmètres (DE) sont disposés sur chaque vanne (VA). Pour le contrôle du bon fonctionnement des débitmètres, la pression dans l'enceinte est mesurée à l'aide d'une jauge (JA) (ACTIVE GAUGE, marque
10 de commerce, de chez EDWARDS HIGH VACUUM).

Mise en route de la cathode

La cathode (CA) utilisée dans le cadre de l'expérience est une cathode « MIREA », comme décrite dans le document Luc Albarède,
15 « Etudes expérimentales d'un propulseur à effet hall : comportement stationnaire et dynamique du flux d'électrons », thèse 2004, Université d'Orléans [25]. Elle est mise en route dans les mêmes conditions que pour un plasma de xénon à savoir :

- un débit de xénon de 0,2 sccm (CNTP) est introduit dans ladite
20 cathode ; et
- le courant de chauffage de la cathode est augmenté progressivement jusqu'à 12 Ampère.

Allumage du plasma d'argon

De l'argon est introduit dans un premier temps dans le propulseur
25 (P) avec un débit, par exemple 24 sccm. Ensuite, l'alimentation de la tension de décharge du propulseur est portée à une valeur de 220 V.

Le dispositif d'amorçage de la décharge, appelé encore « keeper » ou « extracteur d'électron de la cathode », est porté transitoirement à une tension de 220 V. Une décharge créant un plasma est
30 alors initiée avec de l'argon pur. La pression résiduelle mesurée est, par

exemple de 2×10^{-2} Pa pour un flux d'argon de 24 sccm, c'est à dire un volume de 24 cm³ / minute, exprimé dans les CNTP.

Ajout de xénon

5 Une fois le plasma d'argon généré, le débit de l'argon est maintenu fixe, par exemple à 24 sccm, et un flux de xénon conforme à la présente invention est ajouté. Dans ces expérimentation, on ajoute un flux de xénon conforme à la présente invention, entraînant une proportion de xénon inférieure à 50 % en volume, exprimé dans les CNTP, du mélange
10 Ar-Xe. Différentes expérimentations sont réalisées, avec différents pourcentages en xénon : 20%, 15 %, 10%, 7%, 5%, 2% par rapport au volume total du mélange argon + xénon, exprimé dans les CNTP.

Par exemple, dans l'une des expérimentations réalisées, le débit d'argon étant maintenu à 24 sccm, le débit de xénon a été testé à différentes
15 valeurs, dont des valeurs allant de 0,5 sccm à 2 sccm les Conditions Normales de Température et de Pression (CNTP), ce qui correspond respectivement à des mélanges Ar(98%)+Xe(2%) à Ar(93%)+Xe(7%), les pourcentages étant des pourcentages volumiques par rapport au volume total du mélange argon + xénon, exprimés dans les CNTP.

20

Résultat de l'ajout du flux de xénon

Suite à l'ajout du flux de xénon, la pression résiduelle est mesurée pour comparaison. Il s'avère que la pression n'est pas significativement modifiée par l'ajout des flux de xénon testé, lorsqu'ils se situent aux
25 pourcentages précités. A titre d'exemple, l'ajout de 1 sccm de xénon, soit une proportion de 4% en volume (CNTP) par rapport au volume total d'argon et de xénon, fait passer la pression de 2×10^{-4} Pa à $2,1 \times 10^{-4}$ Pa. Cette variation n'étant pas significative, aucun effet lié à la pression n'a été considéré pertinent.

30 Les performances du plasma formé sont déduites des mesures du courant total moyen de décharge donné par l'ampèremètre de l'alimentation de décharge (référence SM 400-AR-8 de chez DELTA

ELEKTRONIKA), de la mesure du courant d'ions obtenue par une sonde à potentiel retardateur décrite dans le document Christelle Philippe, « Caractérisations spatio-temporelles de jets ioniques : développement des diagnostics et application à la propulsion », thèse 1998, Université d'Orléans
5 [26], et une analyse spectroscopique du jet d'ions en sortie de canal dont l'émission de lumière éclaire l'entrée d'une fibre optique qui la guide à l'entrée d'un spectromètre (référence AvaSpec-3648-USB2, de chez AVANTES Enlightening Spectroscopy). Le montage optique est similaire à celui qui est décrit p130 dans le document [22].

10

Exemple 2 : Expérimentations comparatives d'ionisation selon l'art antérieur et selon l'invention

Mesure du courant de décharge

15

La figure 3 représente une comparaison du courant de décharge d'un plasma d'argon pur mesuré pour un débit d'argon entre 24 sccm et 30 sccm, avec un courant de décharge d'un plasma d'argon-xénon (Ar+Xe) mesuré pour un débit d'argon fixe à 24 sccm et un débit de xénon allant de 0,5 sccm à 1,5 sccm, soit un mélange argon-xénon avec des proportions de
20 xénon allant de 2 % à 5,8 %.

20

Ce diagramme montre clairement que le courant de décharge augmente fortement lorsque le flux de xénon est ajouté au plasma d'argon.

25

A titre d'exemple, pour un débit total de 24,5 sccm d'argon, le courant mesuré est de 1,05 Ampère, alors que pour le même débit comprenant 24 sccm d'argon et 0,5 sccm de xénon, soit 2% en volume de
25 xénon, par rapport au volume total argon + xénon, le courant est de 1,25 A. Ceci représente une augmentation de 19% par rapport à un plasma d'argon pur.

30

De la même manière, pour un débit total de 25,5 sccm le courant de décharge est de 1,18 Ampère, lorsqu'il s'agit d'argon pur, et de 1,73 Ampère lorsqu'il s'agit d'un mélange à 94.2% d'argon et 5.8% de xénon, les pourcentages étant exprimés en volume par rapport au volume total d'argon

et de xénon, exprimé dans les CNTP. L'ajout de 5,8% en volume de xénon au plasma d'argon représente donc une augmentation de 46,6% du courant de décharge.

La figure 3 annexée montre très clairement que l'évolution du courant de décharge du plasma Ar+Xe suit une caractéristique linéaire, dans la plage des flux de xénon ajoutés, drastiquement différente de celle d'un plasma d'argon pur.

Les inventeurs ont considéré que cette augmentation du courant moyen de décharge peut avoir plusieurs origines :

- une ionisation simple du xénon injecté,
- un renforcement de l'ionisation de l'argon et/ou un surplus de courant d'électrons résultant d'une dérive plus importante des électrons vers l'anode (transport anormal des électrons), ou
- d'une présence renforcée des ions multichargés.

En prenant par exemple un débit de Xe de 24 sccm d'argon et de 1 sccm de xénon, soit 4% en volume de Xe, par rapport au volume total du mélange Ar+Xe (CNTP), le courant de décharge passe de 1,13 A à 1,49 Ampère, soit une augmentation de 0,36 Ampère, c'est-à-dire une augmentation de 32% par rapport à un plasma d'argon pur.

Or, si tout le flux de xénon injecté est ionisé, le surplus du courant, ou courant induit (I_{Xe}) par le xénon, serait de seulement 0,071 Ampère :

$$I_{Xe} = q * \Phi_{Xe}$$

Avec
$$\Phi_{Xe} (at/s) = D_{Xe} [sccm] \frac{10^{-3}}{22.4} \cdot \frac{6,022 \cdot 10^{23}}{60} = D_{Xe} [sccm] * 4,47 \cdot 10^{17}$$

$$I_{Xe} = 0.071A$$

« q » étant la charge d'un électron en valeur absolue et ayant pour valeur $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb.

$D_{Xe}[sccm]$ est le débit de xénon en sccm.

Ainsi, l'augmentation du courant observée expérimentalement étant 5,15 fois plus élevée que la valeur calculée, cette augmentation ne peut s'expliquer par la seule ionisation du xénon ajouté.

5 Mesure du courant d'ions

Le flux d'ions central, c'est-à-dire sur l'axe, est mesuré à l'aide d'un analyseur d'énergie à potentiel retardateur (RPA : Retarding Potential Analyzer, dénommé ci-dessus, réalisation du Groupe de Recherche sur l'Energétique des Milieux Ionisés (GREMI, Orléans, France), décrit dans le document [26]. Le RPA est placé dans l'enceinte sous vide à 73 cm du plan de sortie du propulseur et sur l'axe du propulseur, comme représenté schématiquement sur la figure 2 annexée. Le courant d'ions est collecté à travers une résistance de 500 kOhm et le potentiel de la grille de filtrage est fixé à 50V, ce qui permet de collecter tous les ions, tout en limitant les perturbations électromagnétiques sur les mesures.

La figure 4 annexée représente une comparaison du courant d'ions mesuré par la sonde à potentiel retardateur sur l'axe du moteur, à 70 cm de la sortie du canal d'ionisation, pour un plasma d'argon pur ayant un débit d'argon entre 24 sccm et 30 sccm, avec le courant d'ions mesuré de la même manière pour un plasma d'argon-xénon ayant un débit d'argon fixe à 24 sccm et un débit de xénon allant de 0,5 sccm à 1,5 sccm (CNTP).

De la même manière que pour la figure 3, ce diagramme montre que le courant d'ions augmente fortement lorsqu'un flux de xénon est ajouté au plasma d'argon conformément à la présente invention.

Par exemple, pour un débit total 24,5 sccm d'argon le courant d'ions est de 36 u.a, alors que pour le même débit comprenant 24 sccm d'argon et 0,5 sccm de xénon, soit 2% de xénon en volume, par rapport au volume total du mélange Ar+Xe (CNTP), le courant est de 47 u.a, ce qui représente une augmentation de 30,5% par rapport à un plasma d'argon pur.

De la même manière, pour un débit total de 25,5 sccm le courant d'ions est de 38.5 u.a, lorsqu'il s'agit d'argon pur, mais de 71 u.a lorsqu'il

s'agit d'un mélange à 94,2% d'argon et 5,8% de xénon, en volume de Xe, par rapport au volume total du mélange Ar+Xe (CNTP). L'ajout de 5,8% de xénon au plasma d'argon, en volume de Xe par rapport au volume total du mélange Ar+Xe (CNTP), représente donc une augmentation de 84% du courant d'ions.

En comparant la figure 3 avec la figure 4 annexées, on observe que l'augmentation est plus considérable pour le courant d'ions que pour le courant de décharge.

En effet, si l'on reprend l'exemple d'un débit de 24 sccm d'argon et de 1 sccm de xénon (4% en volume (CNTP) de Xe), le courant d'ions passe de 37,5 u.a à 58,5 u.a, soit une augmentation de 21 u.a, c'est-à-dire une augmentation de 56% par rapport à un plasma d'argon pur. Quant au courant de décharge, il passe de 1,13 Ampère à 1,49 Ampère, ce qui représente une augmentation de 0,36 Ampère, soit 32% par rapport au courant du plasma d'argon pur.

Le coût énergétique payé pour le faisceau d'ions est défini par la puissance électrique fournie c'est-à-dire le produit $I_d \cdot V_d$ où I_d et V_d sont respectivement le courant et la tension fournis par l'alimentation de décharge. Comme V_d est constant, ce coût varie comme le courant de décharge I_d .

Les variations comparées du courant de décharge et du courant d'ions suggèrent que le procédé selon l'invention abaisse le coût énergétique du jet d'ions. Cette hypothèse est confirmée par les deux résultats ci-dessous.

Distribution angulaire du courant

Comme une modification de la divergence du jet d'ions peut influencer sur l'augmentation du flux d'ions mesuré sur l'axe du moteur, la détermination de la distribution angulaire du courant est nécessaire pour vérifier que la divergence du jet d'ions n'est pas affectée.

La figure 5 annexée représente la distribution angulaire du courant de décharge d'argon pur avec un débit de 24 sccm et la distribution

angulaire du courant de décharge d'un mélange de 24 sccm d'argon et 1 sccm de xénon (CNTP).

On constate que la divergence du faisceau n'est pas modifiée par l'ajout de xénon au plasma d'argon et l'augmentation du courant d'ions est
5 homogène suivant les angles d'observation. Ainsi, une déformation angulaire du jet d'ions est exclue.

Ces résultats démontrent que l'apport d'atomes de Xe dans un plasma d'argon, conformément à la présente invention, permet d'améliorer considérablement l'ionisation de l'argon et par ailleurs de diminuer le coût
10 énergétique du jet d'ions.

Mesures par spectroscopie optique

L'émission optique du plasma donne des informations sur la nature des espèces présentes.

15 Pour réaliser ces mesures, le spectromètre utilisé est un spectromètre AVANTES (marque de commerce, référence AvaSpec-3648-USB2, société AVANTES Enlightening Spectroscopy) qui permet de balayer un domaine spectral allant de 200 nm à 1100 nm avec une résolution de 1 nm.

20 Les émissions optiques sont collectées à 3 mm du plan de sortie sur l'axe du canal et grâce à une lentille convergente (LC), sont focalisées sur l'entrée d'une fibre optique (FO) reliée au spectromètre.

Les figures 6a et 6b annexées montrent des exemples de spectres obtenus pour des décharges de xénon pur, d'argon pur et de
25 mélanges conformes à la présente invention, ayant 24 sccm d'argon et entre 0,5 sccm et 2 sccm de xénon, soit des ratios volumiques entre 2% et 7,7% de xénon, en pourcentage par rapport au volume total Ar+Xe (CNTP).

Comme cela est visible sur les deux figures 6a et 6b, l'intensité des raies des ions argon (ArII) augmente progressivement avec
30 l'augmentation du ratio de xénon, ce qui signifie que la quantité d'ions d'argon dans la décharge augmente lorsque la quantité de xénon augmente.

Les inventeurs ont également constaté une quasi constance de l'amplitude des raies émises par les atomes d'argon. Ceci ne peut être expliqué que par une diminution de la concentration de ces atomes, confirmant ainsi l'augmentation de l'efficacité d'ionisation dans ce procédé, selon l'invention.

Ces résultats permettent de conclure que l'efficacité d'ionisation de l'argon est considérablement renforcée par l'ajout de xénon. Cette augmentation de l'efficacité d'ionisation de l'argon est déjà très forte avec un flux d'argon inférieur à 10% en volume de xénon. L'amélioration de l'efficacité d'ionisation de l'argon est corroborée par les mesures des émissions lumineuses du plasma formé.

Les expérimentations décrites ci-dessus sont réalisables avec le krypton ou un mélange xénon et krypton, notamment dans des proportions xénon et/ou krypton en % en volume dans l'argon équivalentes à celles précitées.

Exemple 3 : Procédé de mise en œuvre de l'invention dans un propulseur spatial

La mise en œuvre de l'invention dans le cas d'un propulseur à effet Hall a démontré une efficacité qui s'applique à tout propulseur spatial basé sur le même principe. Il peut s'agir par exemple du propulseur PPS 1350 de SAFRAN décrit dans le document [4].

Exemple 4 : Procédé de mise en œuvre d'un traitement de surface

Des traitements de surface et/ou dépôts de couches minces, utilisés par exemple pour les verres de lunettes, font appel à un bombardement de la surface utilisant des sources d'ions argon, comme décrit dans le document [6]. Les sources d'ions END-HALL, communément utilisées dans ces procédés, font appel à des plasmas magnétisés et relèvent du champ d'application de la présente invention.

Ainsi, le procédé décrit dans le document précité est modifié en remplaçant l'argon pur par un mélange argon-xénon suivant les exemples ci-dessus.

5 **Exemple 5 : Procédé de mise en œuvre d'un traitement de surface**

D'autres dépôts de couches minces font appel à des flux d'espèces obtenus par pulvérisation d'une surface selon une technique appelée décharge magnétron, comme décrit dans les documents [19], [20] ou [21]. Suivant cette technique, des ions argon, créés et accélérés dans
10 un plasma magnétisé, sont communément utilisés pour cette pulvérisation et ces procédés magnétron relèvent du champ d'application de la présente invention.

Ainsi, le procédé décrit dans ces documents est modifié en remplaçant l'argon pur par un mélange argon-xénon suivant les exemples
15 ci-dessus.

Exemple 6 : Exemple de dispositif selon l'invention

La figure 7 annexée présente un dispositif (D) selon l'invention, tel que décrit dans l'exemple 1, aussi appelé moteur PPI. Il s'agit d'un petit
20 moteur à effet Hall dérivé de la technologie des Propulseurs à Plasma Stationnaire en particulier du PPS-100. Dans ce dispositif, le champ magnétique est généré par des aimants permanents (1) à la place du système de bobines classiquement utilisé dans l'art antérieur. Ces aimants forment un circuit magnétique (3, MC) constitué d'un cercle modulaire de
25 petits aimants en Samarium Cobalt (SmCo). L'alternance des aimants avec des barrettes d'inox amagnétiques permet de moduler la valeur du champ magnétique maximale B_{max} qui est pour les essais réalisés égal à 250 Gauss. L'utilisation d'aimants permet de réduire l'encombrement du moteur mais également, lors de la mise en œuvre du procédé de l'invention, de
30 renforcer le rendement propulsif du moteur en économisant la puissance électrique consommée par les bobines.

Un jeu de céramiques de délimitation (5) coaxiales de type BN:SiO₂ (Nitrure de Bore) délimite le canal de décharge (7) de longueur L= 12 mm. Ces céramiques permettent d'isoler électriquement le plasma de la partie métallique du propulseur. Les diamètres des céramiques en question
5 sont de 12 mm pour l'interne et de 21 mm pour l'externe, ce qui donne une section de canal de $9,33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

Le gaz apporté via un canal d'arrivée de gaz (9) est injecté dans le canal à travers une céramique poreuse (11) qui a un double rôle, d'une part réduire la pression d'arrivée du gaz, effet tampon, et d'autre part
10 homogénéiser la répartition de ce dernier dans le canal de décharge (7). La tension de décharge est appliquée entre l'anode (13) localisée au fond du canal de décharge (7) et une cathode creuse externe (non représentée).

Un tube de refroidissement (15) en cuivre noirci fixé à l'arrière du moteur, au niveau d'un drain thermique (17) permet de le refroidir par rayonnement et d'éviter la montée de la température au-delà de la
15 température de Curie des aimants ($T^{\circ}\text{c}(\text{SmCo}) = 750^{\circ}\text{C}$).

Sur cette figure sont également représentés la connexion anode (19), la canne d'accroche (21) du moteur et le thermocouple (23).

Le système de refroidissement du dispositif (D) représenté sur la
20 figure 7 peut être complété par un moyen de régulation de la température de la chambre d'ionisation, par exemple un moyen contrôlé de refroidissement de la chambre d'ionisation. Il s'agit dans cet exemple d'un système de refroidissement (SAR) additionnel, par exemple tel que celui représenté sur la figure 8 annexée. Le principe de ce système est de refroidir
25 le moteur par contact thermique avec une circulation d'eau dont la température d'entrée est asservie à une consigne. Le système repose sur un « chiller » (CH) (refroidisseur), dans l'exemple présent un bain Polystat 36 en circuit fermé. Une consigne en température (du liquide caloporteur) est appliquée et le « chiller » (CH) régule la température du bain en fonction
30 de la température du reflux. Lorsque la régulation est idéale, la température du bain est égale à celle de la consigne.

Le contact thermique a été assuré de deux façons différentes détaillées ci-dessous. Elles ont en commun deux propriétés :

- Garantir une circulation d'eau sous vide ne tolérant aucune fuite
- Assurer une isolation électrique fiable, par rapport au caisson à vide, de la partie du circuit de refroidissement en cuivre qui est en contact thermique et électrique avec le moteur.

Dans un mode de réalisation particulier, appelé C1, un tube de cuivre de diamètre 4 mm a été enroulé autour du moteur pour effectuer le refroidissement : deux tours autour de la partie mécanique en contact direct avec la céramique externe et les aimants de la couronne externe, un tour sur le bloc de cuivre à l'arrière du moteur. L'essentiel du flux thermique est évacué par l'arrière, le contact thermique à cet endroit est primordial. Des vis de maintien viennent en appui pour renforcer le contact. Dans ce cas, le contact thermique est distribué par l'enveloppe externe qui entoure la céramique externe du canal.

Dans un autre mode de réalisation, appelé C2, les inventeurs ont conçu une pièce adaptée au PPI, tout en respectant les différents passages déjà existants sur le PPI. La difficulté d'une telle réalisation réside dans la précision de l'usinage de la pièce mais aussi et surtout sur la brasure argent qui doit être parfaite pour éliminer tout risque de fuite d'eau dans le caisson à vide utilisé pour les essais. Cette pièce a été ici une pièce annulaire en cuivre positionnée à l'arrière du moteur, en contact thermique avec celui-ci.

Quelque soit le mode de réalisation, le même circuit extérieur de refroidissement a été utilisé. La figure 8 annexée montre le principe de ce circuit de refroidissement pour le mode de réalisation avec la pièce annulaire, où le système assure une température constante à l'entrée. Il a par exemple été réglée à 25°C. L'arrivée et la sortie d'eau au niveau du moteur sont connectées à celles du « chiller » (CH) à travers plusieurs raccords étanches au vide.

Sur cette figure 8 sont représentés, le système de refroidissement (SR) étanche au vide constitué par une pièce annulaire en cuivre pour un refroidissement par contact thermique, le moteur PPI (D) représenté sur la

figure 7, le caisson a vide (CV) qui a été utilisé pour l'expérimentation, les tubes en cuivre (TV), les raccords étanches au vide (REV), le passage étanche au vide (PEV), incluant isolation thermique et électrique, et les tubes de circulation du liquide de refroidissement (PFA). Les flèches positionnées
5 à gauche du « chiller » (CH) indiquent la sortie (SO) d'eau du « chiller », à température constante, et l'entrée (EN) dans le « chiller » ou retour, à température variable, suivant l'utilisation du PPI.

Les inventeurs ont reporté sur la figure 9 annexée des résultats de fonctionnement des deux modes de réalisation C1 et C2 précités. Cette
10 figure représente en particulier l'évolution de la température du dispositif de la présente invention schématisé sur la figure 7, en fonction du temps de fonctionnement suivant deux systèmes de refroidissement C1 et C2. En ordonnée est représentée la température du moteur (TM) en °C, et en abscisse le temps (t) de fonctionnement du moteur en minutes.

Les inventeurs ont reporté sur la figure 10 des résultats de mesure de la température et du courant de décharge sur le système de refroidissement C2. Cette figure représente en particulier l'évolution de la
15 température du moteur et du courant de décharge en fonction du temps de fonctionnement. En ordonnée à gauche est représenté le courant de décharge moyen (CDM) en A (Ampères), en ordonnées à droite est représenté la température du moteur (TM) en °C, et en abscisse le temps (t) de fonctionnement du moteur en minutes.

Sur la base de ces expérimentations, les inventeurs ont notamment observé que le temps de mise à l'équilibre thermique a été plus
25 court avec ces système, en particulier avec la pièce annulaire en cuivre. L'équilibre atteint était sensiblement le même pour les deux modes de réalisation. Le système utilisant la pièce annulaire en cuivre s'est montré plus fiable au cours des essais, le contact thermique étant garanti similaire après chaque intervention sur le moteur.

30 Les inventeurs ont également observé que la température du moteur a été significativement réduite grâce à ces systèmes additionnels de refroidissement, par exemple lors d'essais de 300°C à moins de 200°C. Ainsi,

pour le même point de fonctionnement, le courant de décharge se stabilise à 0,80 A contre 0,87 A mesurés antérieurement dans les mêmes conditions opératoires de mise en œuvre du procédé de l'invention.

Les inventeurs ont ainsi noté des progrès très significatifs, en particulier ceci a permis de faire fonctionner le PPI avec un courant moteur de 1,8 A jusqu'à plus d'une heure alors que la montée en température ne laissait auparavant que quelques minutes de fonctionnement avant d'atteindre la température maximale tolérable qui est de 300 °C.

10 **Exemple 7 : Expérimentations d'ionisation selon le procédé de l'invention avec un mélange Ar + Xe**

Les conditions opératoires et matériel utilisés sont ceux décrits dans les exemples 1 et 2, avec le dispositif de l'exemple 7 ci-dessus.

Le courant de décharge est la somme du flux d'ions sortant du canal et du flux d'électrons entrant dans le canal. En conséquence, plus le rapport de ce flux d'ions au courant de décharge est élevé, meilleur est le rendement électrique du moteur.

Le tableau I de cet exemple 8 suivant montre les résultats obtenus dans cet exemple, les résultats P3 étant ceux obtenus dans les exemples 1 et 2 précités, et P2 dans le présent exemple.

Tableau I de l'exemple 7 :

Débit de xénon ajouté (sccm)	0		0,5		1	
Point de fonctionnement	P2	P3	P2	P3	P2	P3
$I_d (Xe+Ar)$ (A)	0,92	1,15	1,11	1,36	1,27	1,6
$\% \Delta I_d / I_{d(Ar)}$	-	-	13%	12%	30%	33%
$\% \Delta I_{coll} / I_{coll(Ar)}$	-	-	42%	32%	71%	63%

- $I_d (Xe+Ar)$ (A) est le courant de décharge, mesuré en ampères, pour une tension de décharge de 220 Volts , un débit d'argon de 24 sccm et un débit de xénon variant de 0 à 1 sccm.
- $\Delta I_d / I_d (Ar)$ est l'augmentation du courant de décharge induite par un ajout de xénon, rapportée au courant sans ajout de xénon.
- $\Delta I_{coll} / I_{coll} (Ar)$ est la variation similaire pour le courant d'ions mesuré sur l'axe du jet d'ions émis

L'émission optique du plasma donne des informations sur la nature des espèces présentes. Les émissions optiques du plasma à 3 mm du plan de sortie sont focalisées sur l'entrée d'une fibre optique reliée au spectromètre AVANTES-3648-USB2. L'analyse de l'émission des raies Ar II et Ar I en fonction du débit de Xe ajouté montre que l'intensité des raies Ar II augmente significativement avec l'ajout de Xe, tandis que celle des raies Ar I reste très stable. Ces résultats en appui de l'augmentation du courant collecteur démontrent incontestablement l'amélioration du rendement d'ionisation de l'argon grâce au procédé de la présente invention.

Le tableau II suivant de cet exemple récapitule les différentes augmentations à savoir pour le débit, le courant de décharge et d'ions. On observe que le rendement ionique est amélioré avec le dispositif décrit dans l'exemple 7, et les conditions expérimentales des exemples 1 et 2. Ainsi, lorsque 4% de flux d'atomes est ajouté, le courant de décharge augmente de 31 % et le courant d'ions de 82% contre 70% auparavant.

Tableau II de l'exemple 7 :

Débit de xénon ajouté (sccm)	0	0,5	1	1,5	2	2,5
D_{Xe} / D_{Ar} (%)	0	2,1	4,2	6,2	8,3	10,4
$\Delta I_d / I_{d(Ar)}$ (%)	0	18,5	31	43	54,6	66,5
$\Delta I_{coll} / I_{coll (Ar)}$ (%)	0	57,6	82	106	124	138

La figure 11 représente l'évolution d'un courant d'ions sur l'axe en fonction du potentiel de répulsion du RPA (VRPA) pour différentes conditions de décharge et une tension de décharge $U_d = 220$ V lors de la mise en œuvre du procédé de la présente invention dans le dispositif. Sur cette figure, en ordonnée est représenté le courant d'ions moyen (CIM) en unité arbitraires (u.a.), et en abscisse la tension de répulsion (V) (TR) en V (Volts). Ces résultats montrent que l'ajout de Xe conforme à la présente invention donne aux ions Ar une énergie mieux définie et plus importante, ce qui est notamment intéressant en propulsion.

Egalement, à travers ces expérimentations, il est observé que le courant d'ions augmente quelque soit l'énergie des ions. Le comportement de la décharge en Ar pur est très différent des autres, cela montre que l'ajout de Xe dans la décharge Ar pur conformément à la présente invention, modifie drastiquement l'énergie des ions en plus du flux d'ions total.

Exemple 8 : Expérimentations d'ionisation selon le procédé de l'invention avec un mélange Ar + Kr

Les conditions expérimentales sont celles décrites dans les exemples 1 et 2 ci-dessus, mais le Xe a été remplacé par le Kr, pour la mise en œuvre du procédé de la présente invention.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous, et sur la figure 12 annexée.

Tableau de l'exemple 8 :

Débit de krypton ajouté (sccm)	0	0,55	1,1	1,65	2,2	2,75	3,3	3,85	4,4
D_{Xe} / D_{Ar} (%)	0	2,3	5,58	6,9	9,2	11,5	13,8	16	18,3
$\Delta I_d / I_{d(Ar)}$ (%)	0	16,5	27,2	37,9	48,5	57,3	67	76,2	90,3
$\Delta I_{coll} / I_{coll(Ar)}$ (%)	0	28,7	52,4	74,5	96,5	115	131,4	146,6	179

La figure 12 représente quant à elle l'évolution mesurée du courant de décharge et du courant collecteur d'ions sur l'axe en fonction du

débit total lors de la mise en œuvre du procédé de la présente invention avec un mélange Ar + Kr. En ordonnée à gauche est représenté le courant de décharge (CD) en ampères (A), à droite le courant d'ions (CI) en unités arbitraires (u.a.), et en ordonnée le débit total Ar+Kr (sccm).

- 5 Comme elles l'ont montré pour le xénon, les signatures spectrales de l'augmentation de l'ionisation confirment à travers ces expérimentations les résultats remarquables de la présente invention.

Listes des références

- 5 [1] C.O. BROWN and E. A. PINSLEY, "Further experimental investigations of a cesium hall-current accelerator", AIAA Journal, Vol. 3, No. 5 (1965), pp. 853-859, doi: 10.2514/3.3006
- [2] D.Goebel, I.Katz « fundamentals of electric propulsion and Hall thrusters », Wiley book, 2008.
- 10 [3] A.Leufroy, T.Gibert, A.Bouchoule, « Characteristic of a permanent magnet low power thruster », 21eme IEPC, Ann. Arbor Michigan, sept 2009.
- [4] WO2009016264, M.Guyot, « Hall effect ion ejection device ».
- [5] H.R.Kaufman, R.S.Robinson, R.I.Seddin, « End hall ion source », J.Vac.sci.technology, A5(4), july/august 1987.
- 15 [6] WO2002011195, « Method for depositing a fluorine-doped silica film », Essilor.
- [7] WO1999058737, Kaufman et Robinson, « Apparatus for sputter deposition ».
- 20 [8] Paganucci et al., « Performance of an Applied Field MPD Thruster », Presented as Paper IEPC-01-132 at the 27th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, 15-19 October, 2001, Published by the Electric Propulsion Society.
- [9] G.A. Battiston et al., « PECVD of amorphous TiO₂ thin films : effect of growth temperature and plasma gas composition », Elsevier, Thin Solid Films 371 (2000) 126-131.
- 25 [10] John A. Thornton et al., « Plasma-assisted deposition processes : theory, mechanisms and applications », Elsevier Sequoia, Thin Solid Films, General Film Behaviour, 107(1983) 3-19.

- [11] Dirk Hegemann et al. « Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement », Elsevier, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 208 (2003) 281–286.
- 5 [12] M. Charbonnier et al., « Tin-free electroless metallization of glass substrates using different PACVD surface treatment processes », Elsevier, Surface and Coatings Technology 162 (2002) 19–30.
- [13] Changquan Wang et al., « Preparation of hydrophobic coating on glass surface by dielectric barrier discharge using a 16 kHz power supply », Elsevier, Applied Surface Science 252 (2006) 8348–8351 286.
- 10 [14] Jan Schmidt, « Surface passivation of silicon solar cells using plasma-enhanced chemical-vapour-deposited SiN films and thin thermal SiO₂/plasma SiN stacks », Institute of Physics Publishing, Semiconductor Science and Technology, Semicond. Sci. Techn. 16 (2001) 164-170, www.iop.org/journal/ss PII:S0268-1242(01)17198-1.
- 15 [15] R. Morent et al., « Non-thermal plasma treatment of textiles », Elsevier, Surface & Coatings Technology 202 (2008) 3427–3449.
- [16] Michael Deilmann et al., « Permeation mechanisms of pulsed microwave plasma deposited silicon oxide films for food packaging applications », Journal of Physics D : Applied Physics, J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 135207 (7pp).
- 20 [17] WO2000005742, Source d'ions, Saintech Pty Limited.
- [18] WO2005024086, Procédé de dépôt d'une couche amorphe contenant majoritairement du fluor et du carbone et dispositif convenant à sa mise en œuvre, Essilor Int..
- 25 [19] P.J.Kelly , R.Arnell, « Magnetron sputtering : a review of recent developments and applications », vacuum, Vol.56, Issue 3, Mars 2000.
- [20] K.Sarakinos, J.Alam, S.Konstantidinis, « High power pulsed magnetron sputtering: a review on scientific and engineering state of the art », Surface and coatings Technology 204 (2010).

- [21] Hidler et Kenny, « Thin film deposition by sputtering », EP 0 105 409.
- [22] Fatou Diop, « Sources de particules neutres monocinétiques : diagnostics spécifiques et étude physique d'une source de Hall en plasma d'argon ou en mixture xénon-argon », thèse soutenue le 22 juillet 2015, Université d'Orléans.
- [23] Alain Leufroy, « Micropropulsion et diagnostics pour la propulsion spatiale », thèse soutenue le 15/02/2010, Université d'Orléans.
- [24] FR 2 842 261, Propulseur plasmique a effet hall, Centre National d'Etudes Spatiales (CNES).
- 10 [25] Luc Albarède, « Etudes expérimentales d'un propulseur à effet hall : comportement stationnaire et dynamique du flux d'électrons », thèse 2004, Université d'Orléans.
- 15 [26] Christelle Philippe, « Caractérisations spatio-temporelles de jets ioniques : développement des diagnostics et application à la propulsion », thèse 1998, Université d'Orléans.

REVENDICATIONS

1. Procédé d'ionisation d'argon, ledit procédé étant caractérisé en ce que l'argon est ionisé en présence d'un gaz choisi parmi le xénon et/ou le krypton, la quantité en volume d'argon étant supérieure à celle du xénon et/ou du krypton exprimées dans les conditions normales de température et de pression.

2. Procédé de génération d'un plasma comprenant la mise en œuvre du procédé selon la revendication 1.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la quantité de xénon et/ou de krypton est inférieure à 20%, de préférence inférieure à 15%, de préférence inférieure à 10%, de préférence inférieure à 8%, de préférence de 2 à 8%, de préférence de 2 à 6%, de préférence de 4%, la quantité étant exprimée en % en volume, par rapport au volume total d'argon et du gaz choisi parmi le xénon et/ou le krypton, dans les conditions normales de température et de pression.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel on ajoute le gaz choisi parmi le xénon et/ou krypton à l'argon avant et/ou pendant l'ionisation de l'argon.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel l'ionisation est réalisée en présence d'un champ magnétique.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel l'ionisation est réalisée en présence d'un champ magnétique et d'une décharge électrique, le champ magnétique et la décharge électrique étant utilisés pour l'ionisation et/ou l'accélération les ions formés.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel l'ionisation de l'argon est réalisée au moyen d'une source d'ions.

5 8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel la source d'ions comprend :

- une chambre d'ionisation (CH),
- des moyens d'introduction (S_{Ar} , DE, TA, VA) de l'argon à l'intérieur de ladite chambre,
- des moyens d'introduction (S_{Xe} , DE, TA, VA) de xénon et/ou de krypton
- 10 dans ladite chambre,
- une anode,
- des moyens de génération d'une décharge ionisant l'argon une fois introduit dans ladite chambre,
- des moyens de génération d'un champ magnétique (CE, CI), et
- 15 - une cathode (CA).

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel le champ magnétique est essentiellement radial entraînant l'établissement d'un champ électrique essentiellement axial et une

20 accélération axiale des ions formés.

10. Procédé de propulsion comprenant la mise en œuvre du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.

25 11. Procédé selon la revendication 10, dans lequel l'ionisation de l'argon étant réalisée au moyen d'une source d'ions, ladite source d'ions est un propulseur spatial à effet Hall.

30 12. Procédé de traitement de surface comprenant la mise en œuvre du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.

13. Procédé selon la revendication 12, ledit procédé étant un procédé de dépôt de couches minces.

14. Procédé selon la revendication 12 ou 13, dans lequel
5 l'ionisation de l'argon étant réalisée au sein d'une source d'ions, ladite source d'ions est une source magnétron ou une source End-Hall.

15. Dispositif d'ionisation d'argon comprenant :

- une chambre d'ionisation (CH),
- 10 - des moyens d'introduction d'argon (S_{Ar} , DE, TA, VA) à l'intérieur de ladite chambre,
- des moyens de génération d'une décharge continue ou non ionisant l'argon une fois introduit dans ladite chambre (anode, CA),
- des moyens (CE, CI) de génération d'un champ magnétique,
- 15 caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens (S_{Xe} , DE, TA, VA) d'introduction de xénon et/ou le krypton dans l'argon avant ou après l'introduction de l'argon dans la chambre d'ionisation.

16. Dispositif d'ionisation d'argon selon la revendication 15,
20 comprenant en outre un moyen de transfert thermique assurant un refroidissement de la chambre d'ionisation.

17. Dispositif d'ionisation selon la revendication 16, dans lequel
le moyen de transfert thermique comprend un moyen contrôlé du
25 refroidissement de la chambre d'ionisation.

1/9

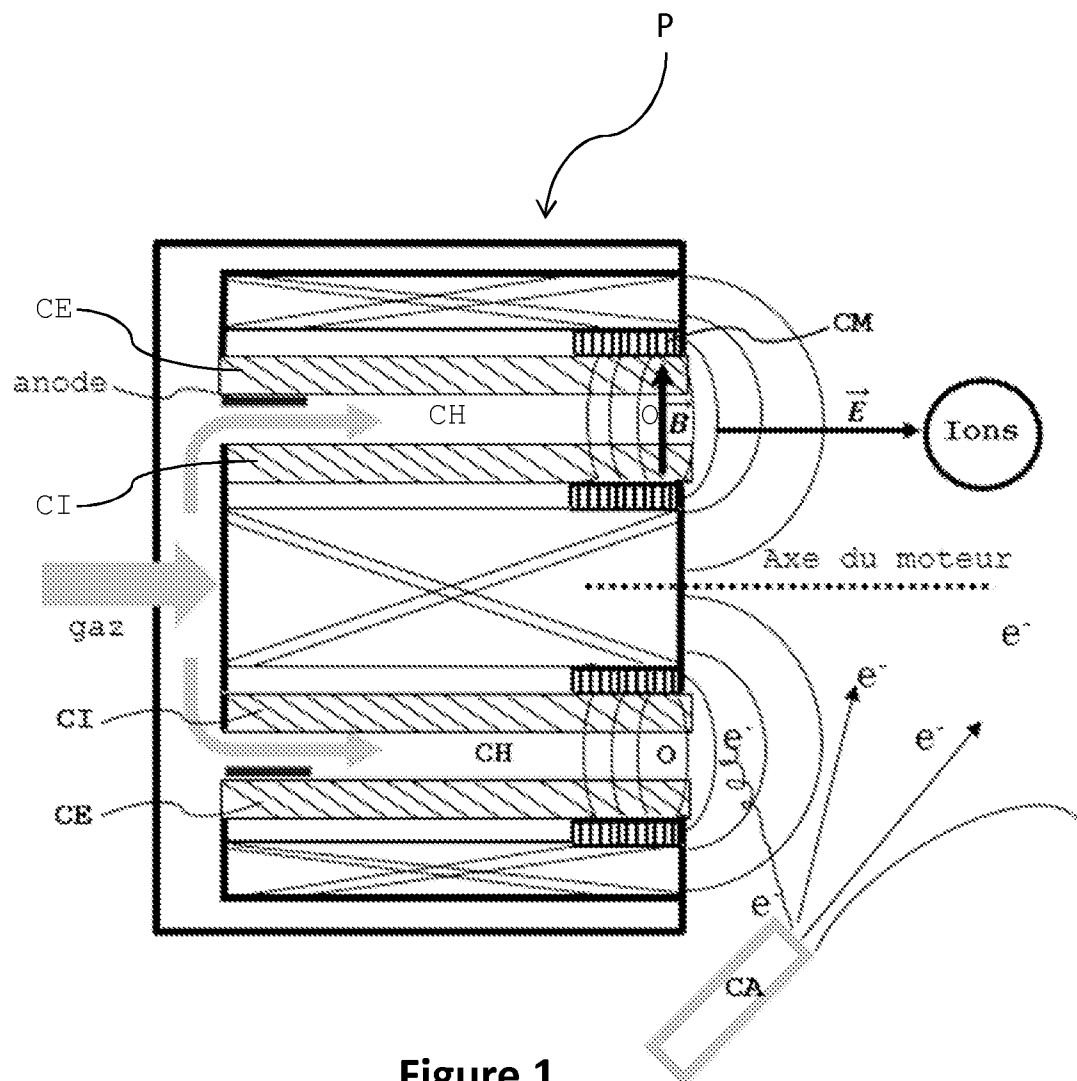


Figure 1

2/9

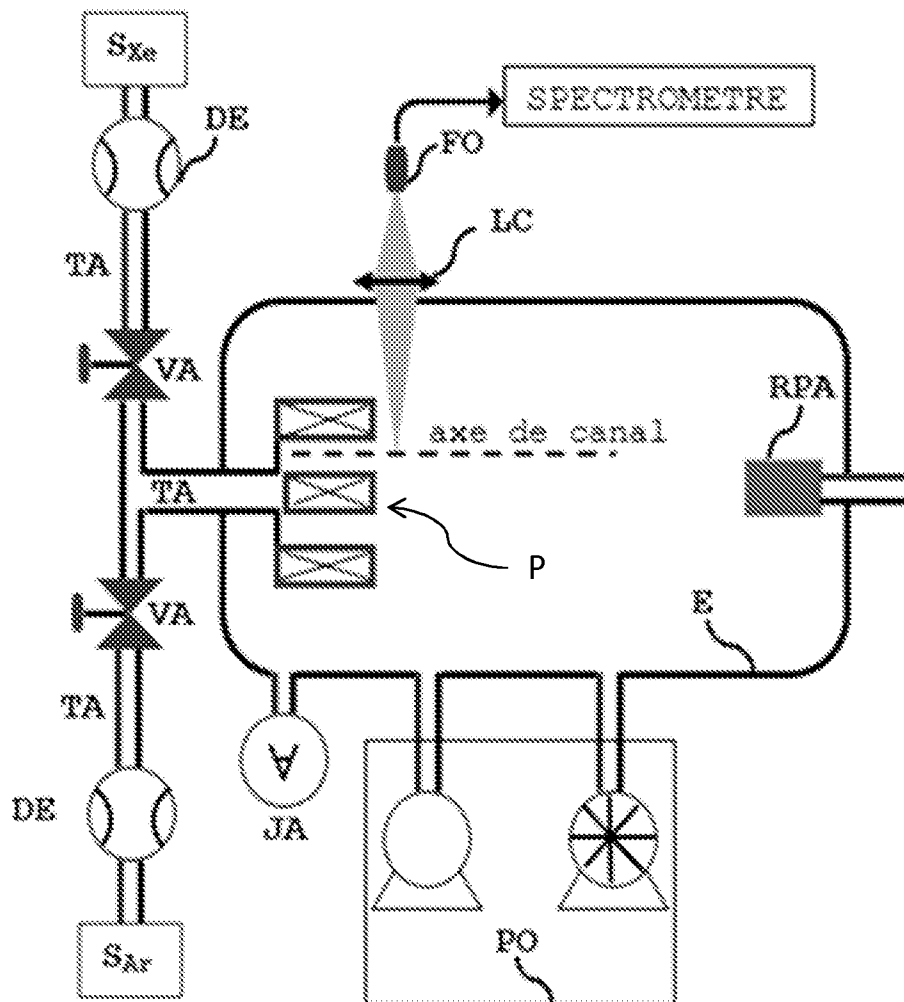


Figure 2

3/9

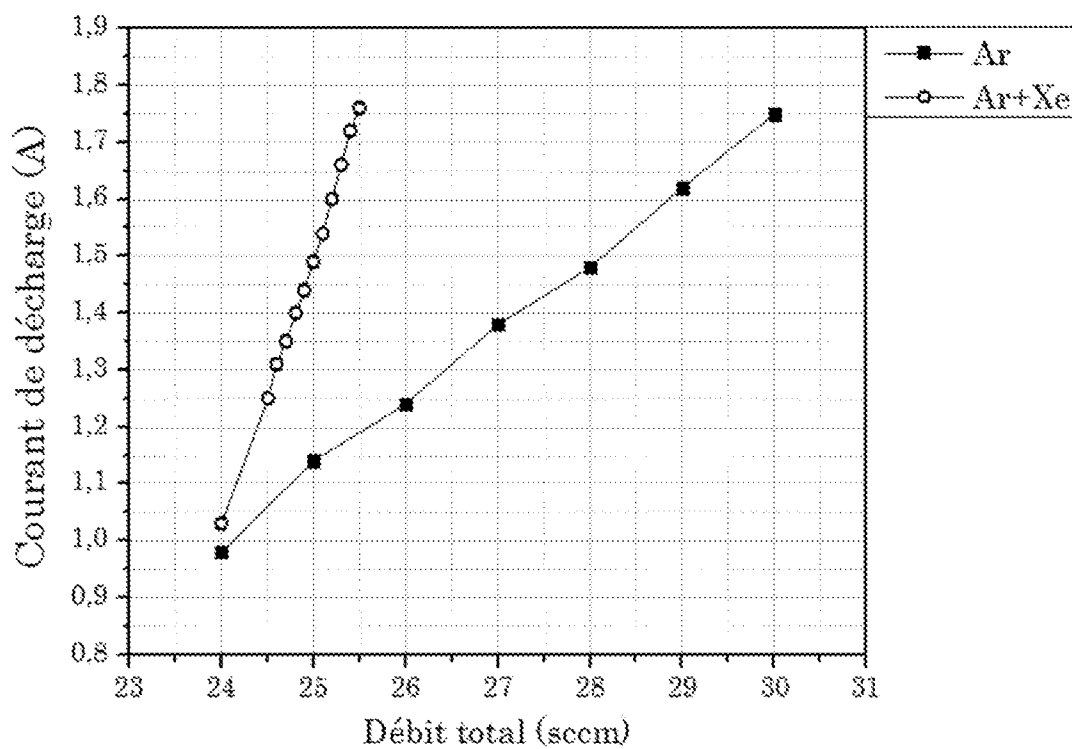


Figure 3

4/9

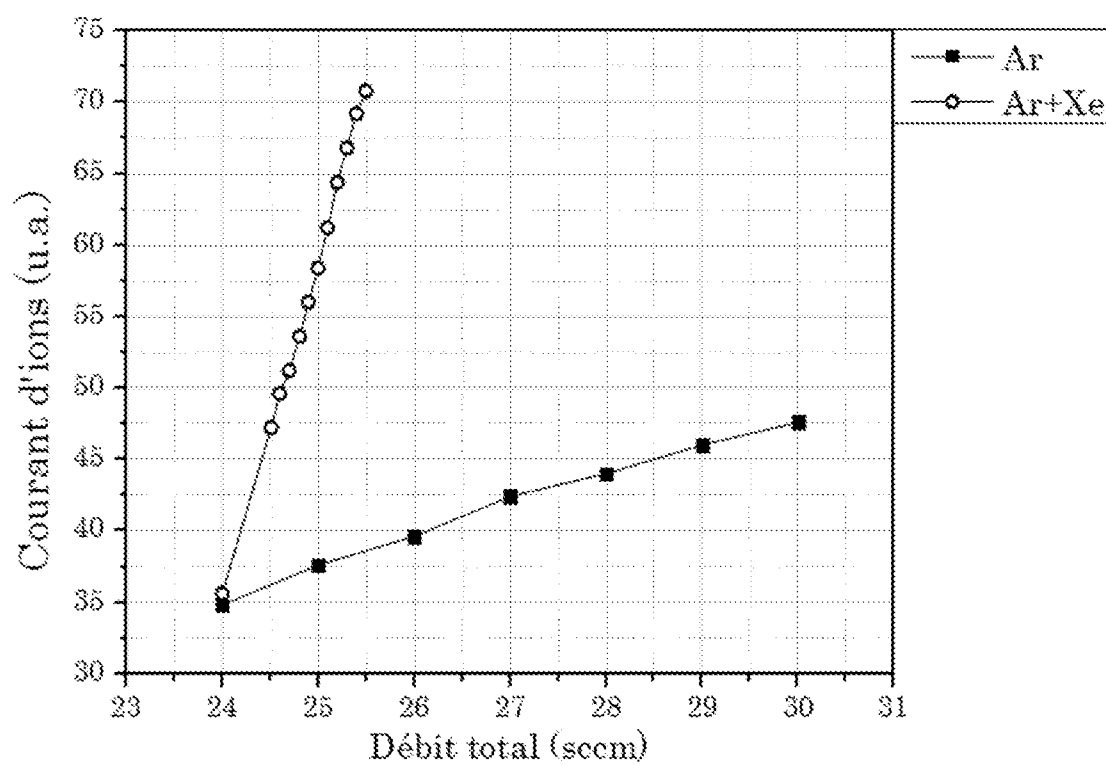


Figure 4

5/9

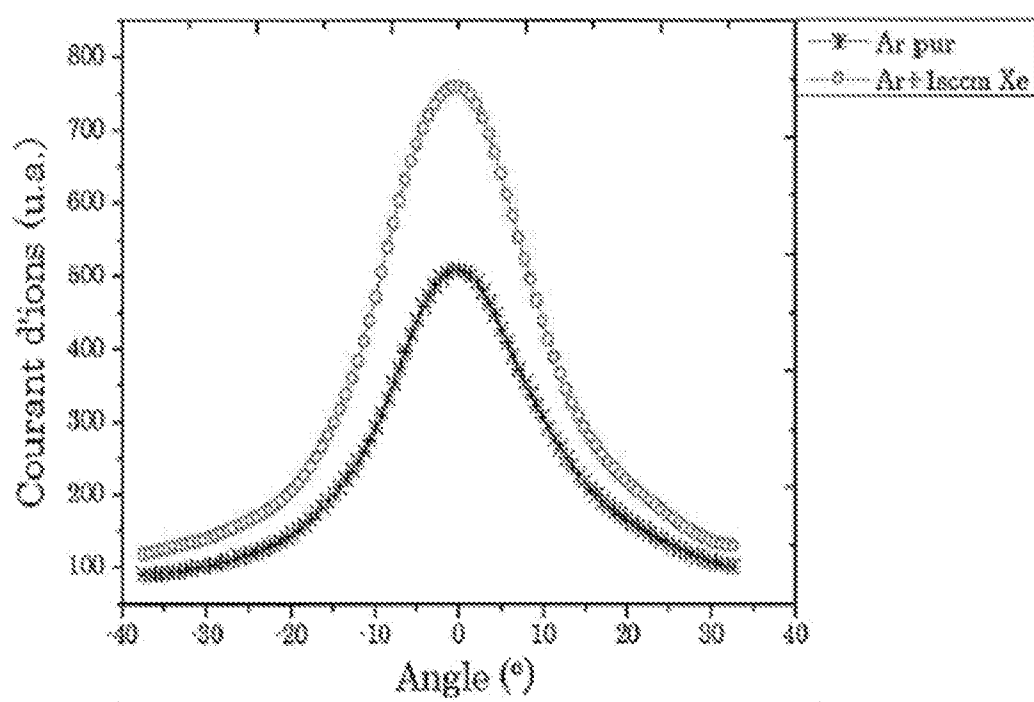


Figure 5

6/9

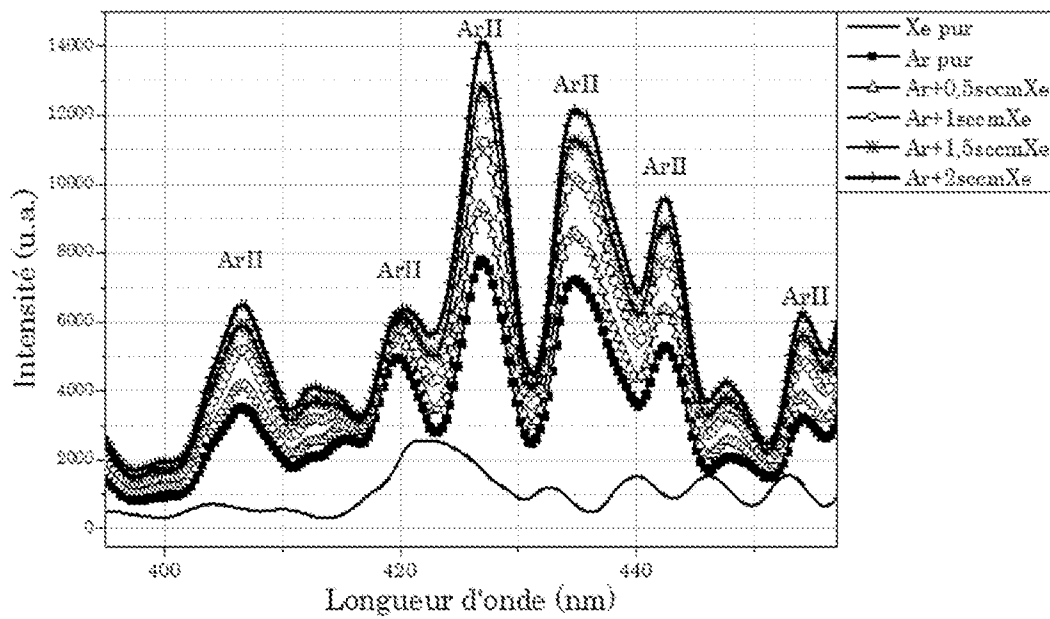


Figure 6a

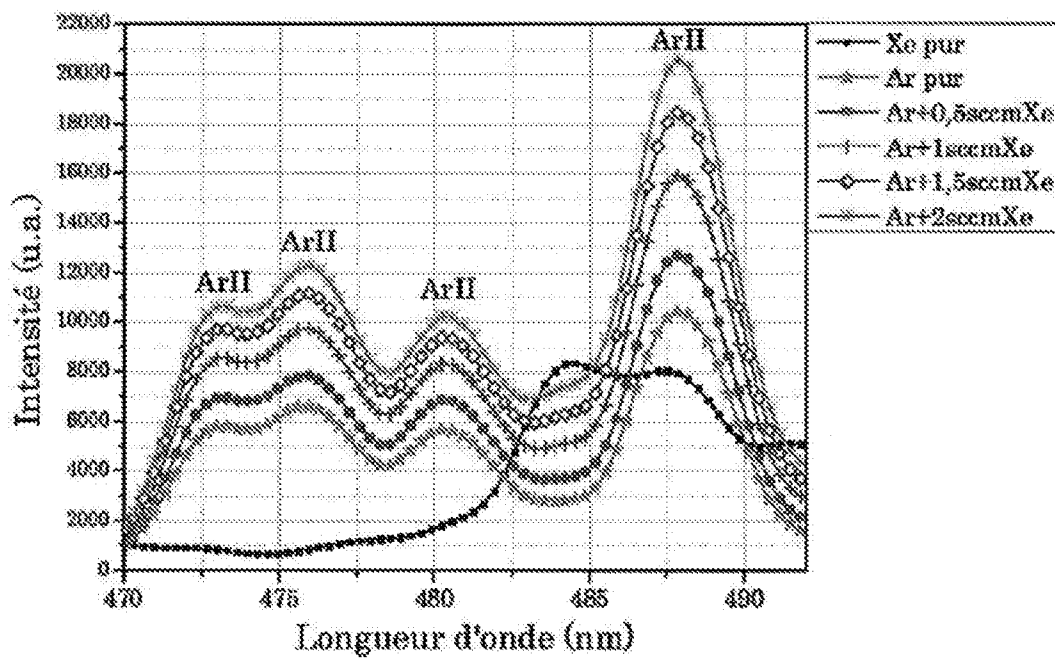


Figure 6b

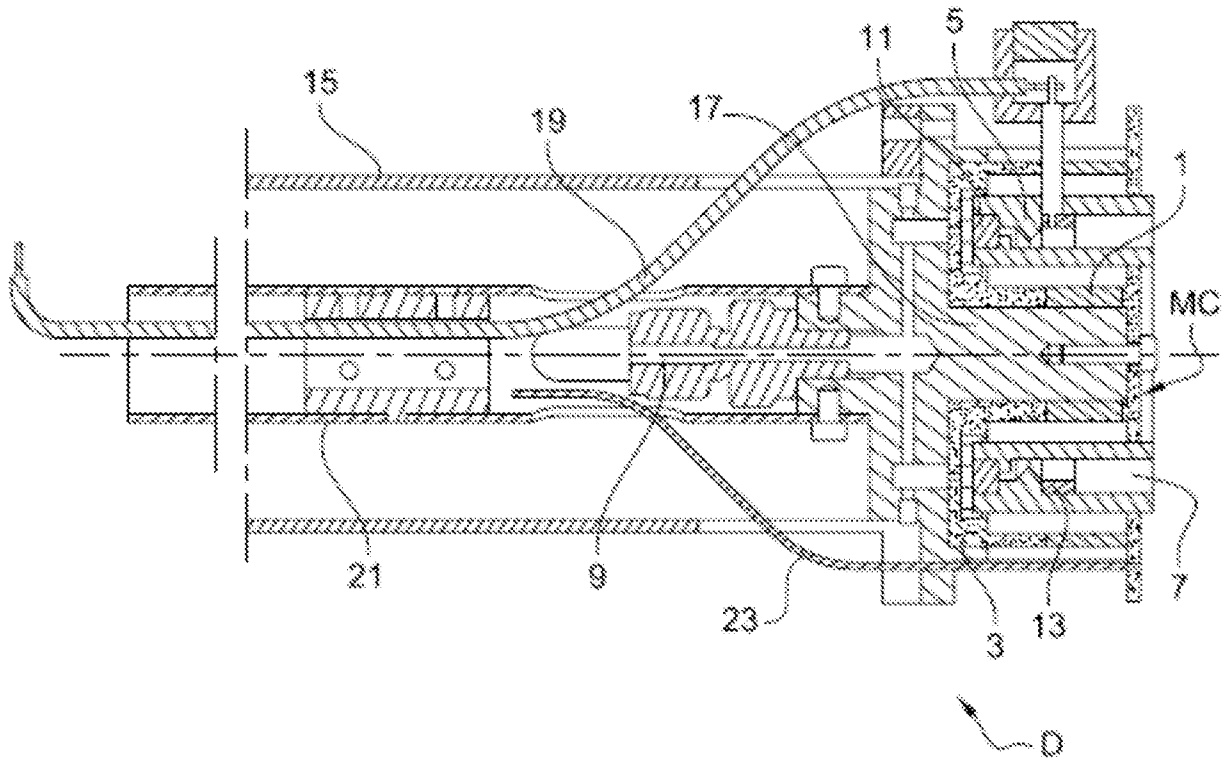


Figure 7

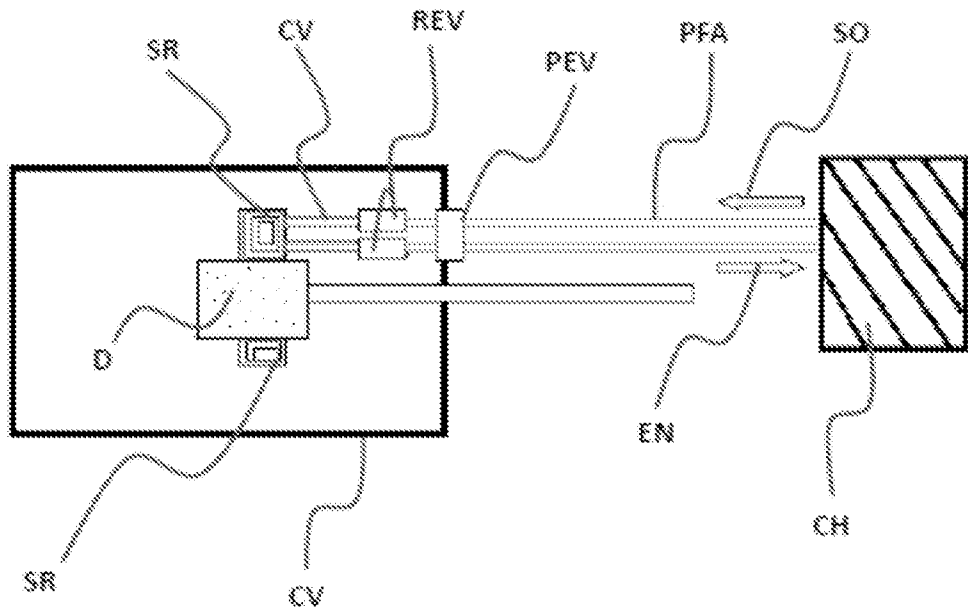


Figure 8

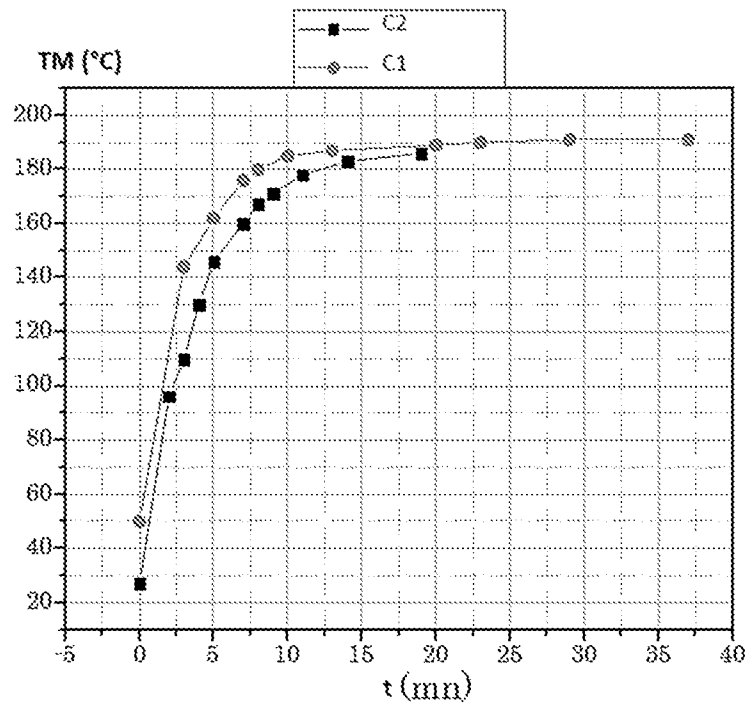


Figure 9

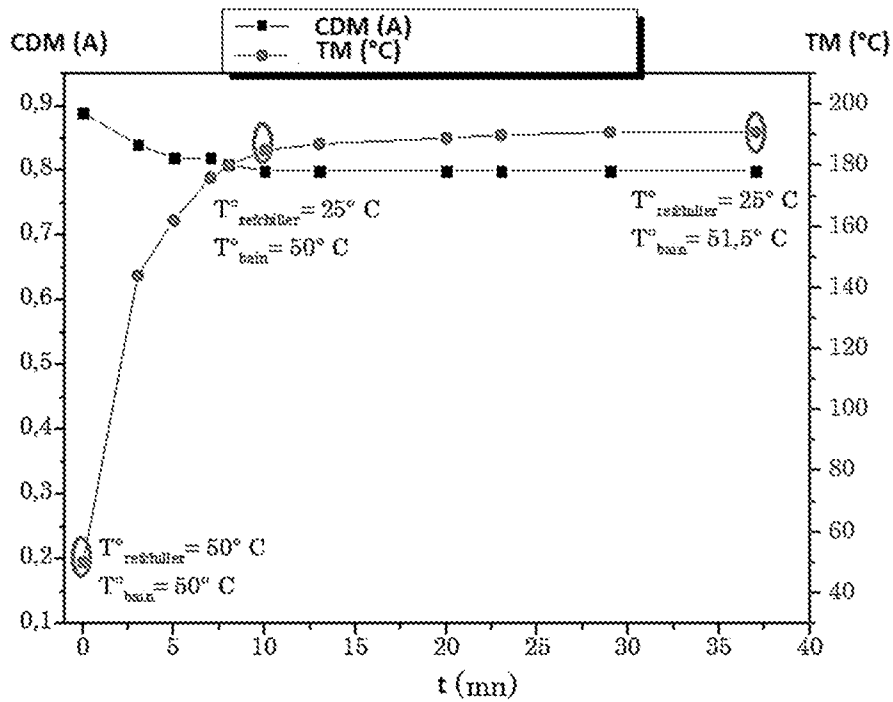


Figure 10

9/9

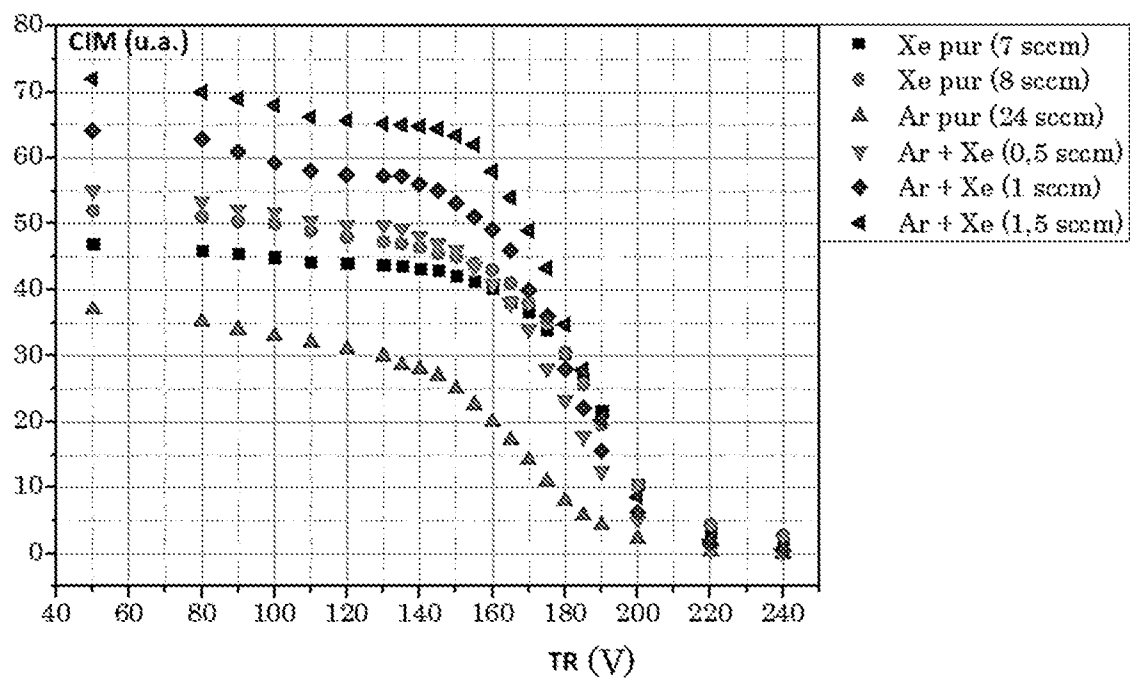


Figure 11

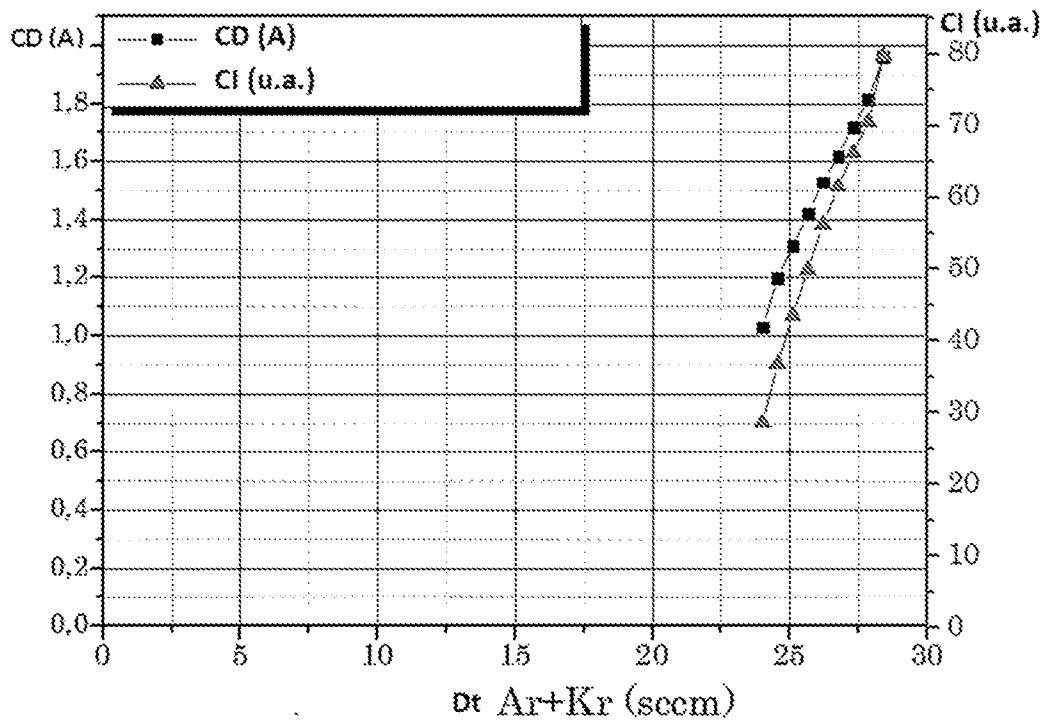


Figure 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2016/053052

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. H05H1/52 F03H1/00 H01J27/02 H01J37/08 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) H05H F03H H01J 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 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category*</th> <th>Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th>Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>US 2014/123924 A1 (MCALISTER ROY EDWARD [US]) 8 May 2014 (2014-05-08)</td> <td>1-6</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>abstract; figure 1B paragraphs [0034], [0036], [0042], [0111], [0112]; table 1 -----</td> <td>7-14</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>EP 1 021 073 A1 (MATRA MARCONI SPACE FRANCE [FR]) 19 July 2000 (2000-07-19)</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>abstract; figure 2 paragraphs [0011], [0020], [0031] -----</td> <td>7-11, 16, 17</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>US 6 486 593 B1 (WANG ZHEHUI [US] ET AL) 26 November 2002 (2002-11-26) abstract column 3, lines 59-62 column 4, lines 47-53 column 5, line 1 -----</td> <td>12-14</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">-/-</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	X	US 2014/123924 A1 (MCALISTER ROY EDWARD [US]) 8 May 2014 (2014-05-08)	1-6	Y	abstract; figure 1B paragraphs [0034], [0036], [0042], [0111], [0112]; table 1 -----	7-14	X	EP 1 021 073 A1 (MATRA MARCONI SPACE FRANCE [FR]) 19 July 2000 (2000-07-19)	15	Y	abstract; figure 2 paragraphs [0011], [0020], [0031] -----	7-11, 16, 17	Y	US 6 486 593 B1 (WANG ZHEHUI [US] ET AL) 26 November 2002 (2002-11-26) abstract column 3, lines 59-62 column 4, lines 47-53 column 5, line 1 -----	12-14	-/-		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.																					
X	US 2014/123924 A1 (MCALISTER ROY EDWARD [US]) 8 May 2014 (2014-05-08)	1-6																					
Y	abstract; figure 1B paragraphs [0034], [0036], [0042], [0111], [0112]; table 1 -----	7-14																					
X	EP 1 021 073 A1 (MATRA MARCONI SPACE FRANCE [FR]) 19 July 2000 (2000-07-19)	15																					
Y	abstract; figure 2 paragraphs [0011], [0020], [0031] -----	7-11, 16, 17																					
Y	US 6 486 593 B1 (WANG ZHEHUI [US] ET AL) 26 November 2002 (2002-11-26) abstract column 3, lines 59-62 column 4, lines 47-53 column 5, line 1 -----	12-14																					
-/-																							
☒ 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		Date of mailing of the international search report																					
18 January 2017		25/01/2017																					
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 Crescenti, Massimo																					

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2016/053052

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2006/218891 A1 (ROY SUBRATA [US]) 5 October 2006 (2006-10-05) abstract; claim 22; figures 1-4 paragraph [0037] -----	16,17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2016/053052

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2014123924	A1	08-05-2014	EP 2914836 A1 09-09-2015
			JP 2015536403 A 21-12-2015
			JP 2016505746 A 25-02-2016
			KR 20150079955 A 08-07-2015
			US 2014123924 A1 08-05-2014
			US 2014123953 A1 08-05-2014
			US 2015059684 A1 05-03-2015
			US 2015059685 A1 05-03-2015
			WO 2014071326 A1 08-05-2014
			WO 2014071328 A1 08-05-2014
EP 1021073	A1	19-07-2000	AT 345662 T 15-12-2006
			AU 2438100 A 01-08-2000
			DE 60031839 T2 31-05-2007
			EP 1021073 A1 19-07-2000
			EP 1161855 A1 12-12-2001
			WO 0042827 A1 20-07-2000
US 6486593	B1	26-11-2002	NONE
US 2006218891	A1	05-10-2006	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2016/053052

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. H05H1/52 F03H1/00 H01J27/02 H01J37/08 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) H05H F03H H01J		
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 2014/123924 A1 (MCALISTER ROY EDWARD [US]) 8 mai 2014 (2014-05-08)	1-6
Y	abrégé; figure 1B alinéas [0034], [0036], [0042], [0111], [0112]; tableau 1	7-14
X	EP 1 021 073 A1 (MATRA MARCONI SPACE FRANCE [FR]) 19 juillet 2000 (2000-07-19)	15
Y	abrégé; figure 2 alinéas [0011], [0020], [0031]	7-11, 16, 17
Y	US 6 486 593 B1 (WANG ZHEHUI [US] ET AL) 26 novembre 2002 (2002-11-26) abrégé colonne 3, lignes 59-62 colonne 4, lignes 47-53 colonne 5, ligne 1	12-14
	----- -/-	
☒ 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 18 janvier 2017		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 25/01/2017
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 Crescenti, Massimo

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 2006/218891 A1 (ROY SUBRATA [US]) 5 octobre 2006 (2006-10-05) abrégé; revendication 22; figures 1-4 alinéa [0037] -----	16,17

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2016/053052

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2014123924 A1	08-05-2014	EP 2914836 A1	09-09-2015
		JP 2015536403 A	21-12-2015
		JP 2016505746 A	25-02-2016
		KR 20150079955 A	08-07-2015
		US 2014123924 A1	08-05-2014
		US 2014123953 A1	08-05-2014
		US 2015059684 A1	05-03-2015
		US 2015059685 A1	05-03-2015
		WO 2014071326 A1	08-05-2014
		WO 2014071328 A1	08-05-2014
EP 1021073 A1	19-07-2000	AT 345662 T	15-12-2006
		AU 2438100 A	01-08-2000
		DE 60031839 T2	31-05-2007
		EP 1021073 A1	19-07-2000
		EP 1161855 A1	12-12-2001
		WO 0042827 A1	20-07-2000
US 6486593 B1	26-11-2002	AUCUN	
US 2006218891 A1	05-10-2006	AUCUN	