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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
17 décembre 2015 (17.12.2015)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2015/189283 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G01N 21/65 (2006.01) *G01N 21/71* (2006.01)
G01J 3/443 (2006.01) *G01N 1/04* (2006.01)
G01N 33/24 (2006.01) *F21V 8/00* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2015/062961

(22) Date de dépôt international :
10 juin 2015 (10.06.2015)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
14 55229 10 juin 2014 (10.06.2014) FR

(71) Déposants : **CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES** [FR/FR]; 2, Place Maurice Quentin, F-75039 Paris Cedex 01 (FR). **THARSYS ENERGY** [FR/FR]; 16, chemin de Chantegrillet, F-69110 Sainte Foy-les-Lyon (FR). **UNIVERSITE PAUL SABATIER-TOULOUSE III** [FR/FR]; 118, route de Narbonne, F-31062 Toulouse Cedex 09 (FR). **CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE** [FR/FR]; 3, rue Michel Ange, F-75794 Paris Cedex 16 (FR).

(72) Inventeurs : **SACCOCCIO, Muriel**; 4, rue les Balcons du Lauragais, F-31450 Pompertuzat (FR). **DIEZ, Hubert**; 8, rue du Bocage, F-31490 Leguevin (FR). **DROMART, Gilles**; 16, chemin de Chantegrillet, F-69110 Sainte Foy-les-Lyon (FR). **MAURICE, Sylvestre**; 8, rue Giuseppe Verdi, F-31500 Toulouse (FR).

(74) Mandataires : **OCVIRK, Philippe** et al.; Office Freylinger S.A., 234, Route d'Arlon, BP 48, L-8001 Strassen (LU).

(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, 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, 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,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : MOBILE SPECTROSCOPIC ANALYSIS DEVICE, IN PARTICULAR FOR GEOLOGICAL ANALYSES

(54) Titre : DISPOSITIF D'ANALYSE SPECTROSCOPIQUE MOBILE, NOTAMMENT POUR ANALYSES GÉOLOGIQUES

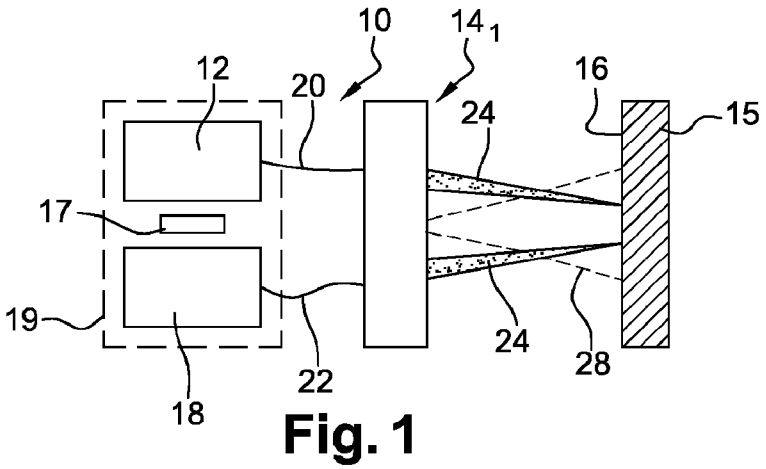


Fig. 1

(57) Abstract : A LIBS analysis device comprises a laser radiation source and a measuring head with optical illumination means suitable for directing at least two separate laser beams towards a target to be analysed, so as to form at least two analysis points on the target spatially separated according to a predefined pattern; and optical collection means for collecting the light emitted by interaction of the incident laser radiation with the target, said optical collection means having a field of vision in which said at least two measurement points are located. One or more spectrometer(s) is (are) used, to analyse the light transmitted by the optical collection means and generate LIBS spectral data. Optical fibre transmission cables transmit the laser radiation from the source to the measuring head, and the radiation collected by the optical collection means to the spectrometer(s).

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2015/189283 A1

DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

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

Dispositif d'analyse LIBS comprend une source de rayonnement laser et une tête de mesure avec des moyens optiques d'illumination aptes à diriger au moins deux faisceaux laser séparés vers une cible à analyser, de sorte à former au moins deux points d'analyse séparés spatialement sur la cible, selon un motif prédéfini; et des moyens optiques de collecte de la lumière émise par interaction du rayonnement laser incident avec la cible, lesdits moyens optiques de collecte ayant un champ de vision dans lequel se trouvent lesdits au moins deux points de mesure. Un ou des spectromètres est (sont) utilisé(s), pour analyser la lumière transmise par les moyens optiques de collecte et générer des données spectrales LIBS. Des câbles de transmission à fibres optiques transmettent le rayonnement laser de la source à la tête de mesure, et le rayonnement collecté par les moyens optiques de collecte vers le(s) spectromètre(s).

Dispositif d'analyse spectroscopique mobile, notamment pour analyses géologiques

Introduction

La présente invention concerne généralement un dispositif d'analyse de la matière par spectroscopie du plasma induit par laser (« Laser-Induced Breakdown Spectroscopy » en langue anglo-saxonne, abrégé en LIBS), et plus particulièrement un tel dispositif dans une version mobile ou transportable.

Etat de la technique

La géologie, l'exploration minière, gazière ou pétrolière, et d'autres applications scientifiques ou opérationnelles d'exploration, sur Terre ou sur d'autres planètes de notre système solaire, nécessitent des analyses pointues, notamment chimiques, de sites jugés intéressants. Ces analyses doivent pouvoir être menées sur des distances pouvant atteindre plusieurs kilomètres, sur un certain nombre de zones très précises. Les matériaux à analyser peuvent varier (solides, liquides ou gazeux) selon les zones explorées. Il s'agit d'analyser précisément la composition du sol dans les différentes zones de chaque site.

L'observation à distance par satellite (de la Terre et d'autres planètes) ou par avion (pour la Terre), par diverses techniques, est de plus en plus répandue, et de plus en plus instructive du fait des progrès réalisés dans le domaine de l'instrumentation. Mais rien ne vaut l'analyse in situ ou, à défaut, l'analyse déportée d'échantillons collectés, pour réellement identifier et quantifier précisément les matériaux présents, et donc évaluer l'intérêt réel d'un ou de plusieurs site(s).

La démarche à l'ancienne du géologue parcourant le terrain avec son marteau existe encore sur Terre. Elle est complétée, de plus en plus souvent, par des carottages suivis d'analyses poussées des carottes en laboratoire, utilisant des instruments non mobiles. Mais le processus entre l'exploration, la sélection, la collecte puis l'analyse des échantillons est donc très long et

coûteux.

Depuis quelques années, des instruments sophistiqués existent en version portable, permettant au géologue d'aller analyser, sur le terrain, quelques échantillons de son choix. Ce sont par exemple des spectromètres LIBS qui sondent le sol et en déduisent la composition chimique élémentaire de celui-ci sur chaque point de sondage/mesure. Cette technique est de plus en plus répandue en géologie de terrain, car, de toutes les techniques permettant une analyse chimique, c'est pratiquement la seule qui permet des analyses in situ, directement sur le terrain. C'est en effet une technique d'analyse rapide, sans contact, et sans préparation d'échantillon.

La technique d'analyse LIBS présente de nombreux intérêts par rapport aux autres techniques utilisées en laboratoire : c'est une technique d'analyse quantitative multi-élémentaire, sensible, et riche en information (spectres larges et résolus). Elle est polyvalente (tous types de matériaux), directe (sans prélèvement ni préparation d'échantillon), non destructive (masse ablatée de l'ordre du µg) et propre (sans émission de gaz). Elle est rapide et flexible : analyses en quelques secondes, en surface et en profondeur (~1 mm hors forage, plus si associé à une foreuse), au contact ou à distance, directement sur le terrain, sur site, ou en laboratoire.

Les instruments LIBS transportables permettent aux géologues d'explorer les sites accessibles en voiture puis à pied. Le géologue doit choisir la zone et les cibles à analyser, puis approcher l'appareil de chaque échantillon ou prélever des échantillons pour les analyser. Ceci est long et fastidieux, et limite nécessairement la quantité d'échantillons sélectionnés et analysés, et la taille ou le nombre de zones analysées. Le géologue passe inévitablement à côté d'échantillons potentiellement très intéressants. Et il reste quantité de zones difficiles voire impossibles d'accès, mais très intéressantes.

Si ceci n'est pas forcément critique dans des applications scientifiques, cela l'est dans le cadre d'applications à visées industrielles (comme l'exploration minière, gazière ou pétrolière) intéressées par la rentabilité des opérations d'exploration.

A ce jour, en dehors de la Terre, on a tenté de faire de la géologie sur la Lune (avec un astronaute géologue), puis sur Mars avec des « rovers » géologues. Le dernier rover martien de la NASA (Curiosity) est équipé d'un laboratoire imposant de géologie mobile. Il contient un spectromètre LIBS (baptisé « ChemCam »), placé en haut d'un mât rotatif, pour permettre l'analyse des alentours du rover sur une distance allant de 1 mètre à près de 10 mètres. C'est un atout majeur pour la mission, car cet instrument permet de pré-évaluer le sol et les roches martiennes d'un site, afin de décider si le rover va se déplacer ou non au contact de ces cibles pour des analyses plus approfondies. Chemcam participe de plus à la mission scientifique du rover qui consiste en l'analyse des sites explorés en vue de déterminer leur habilitabilité. L'analyse chimique du sol martien permet en effet d'évaluer si, dans le passé, les conditions nécessaires au développement de la vie ont pu être réunies dans le site exploré.

Objet de l'invention

L'objectif de la présente invention est de proposer un dispositif d'analyse LIBS amélioré, facilitant l'analyse chimique des cibles/échantillons, en particulier dans le cadre d'analyses in situ de sites d'exploration.

Description générale de l'invention

L'invention a pour objet un dispositif d'analyse LIBS qui comprend :

- une source de rayonnement laser

- une tête de mesure avec:

  - des moyens optiques d'illumination (ou d'irradiation) aptes à diriger au moins deux faisceaux laser séparés vers la cible à analyser (le terme « cible » désigne tout objet à analyser par exemple une falaise, un sol ou un échantillon quelconque), de sorte à former au moins deux points d'analyse séparés spatialement sur la cible, selon

un motif prédéfini ; et

- des moyens optiques de collecte de la lumière émise par interaction du rayonnement laser incident avec la cible, lesdits moyens optiques de collecte ayant un champ de vision dans lequel se trouvent lesdits au moins deux points de mesure ;

- au moins un détecteur spectroscopique (ou spectromètre) pour analyser la lumière transmise par les moyens optiques de collecte et générer des données spectrales LIBS ;

- un premier câble de transmission à fibre optique pour transmettre le rayonnement laser de la source de rayonnement laser vers les moyens optiques d'illumination ;

- un deuxième câble de transmission à fibre optique pour transmettre le rayonnement collecté par les moyens optiques de collecte vers ledit spectromètre.

La conception du dispositif selon la présente invention est optimisée pour une réalisation compacte et mobile, facilitant l'utilisation de terrain. Les moyens optiques d'illumination et de collecte sont intégrés dans une tête de mesure, reliée à la source laser et au spectromètre par des câbles à fibre(s) optique(s). Cela permet de découpler la tête de mesure des organes volumineux et sensibles du dispositif. On pourra donc facilement déplacer et positionner la tête de mesure, qui est un organe comparativement léger, à une certaine distance du groupe laser/spectromètre. En cas d'endommagement de la tête de mesure, elle peut être remplacée, et le groupe laser/spectromètre n'est pas affecté. De même les parties source laser et analyse spectroscopiques peuvent être des modules remplaçables pour maintenance par exemple.

Les moyens optiques d'illumination sont conçus pour travailler avec au moins deux faisceaux laser séparés envoyés sur la cible à analyser, de sorte à former au moins deux points d'analyse séparés spatialement selon un motif prédéfini. L'utilisation de deux faisceaux laser (ou plus) permet de sonder plusieurs points sur la cible en une seule mesure, c'est-à-dire pour un positionnement unique de la tête de mesure par rapport à la cible, et ceci que le tir avec les différents

faisceaux laser soit fait simultanément (en parallèle) ou séquentiellement. Cette capacité de sonder une zone de mesure en plusieurs points (et en une seule étape de mesure) est particulièrement intéressante dans le cas d'échantillons hétérogènes, car cela permet de déceler une hétérogénéité de la matière par les réponses LIBS différentes obtenues, ce qui n'est pas révélé par une mesure en un point unique. Ainsi, le dispositif selon l'invention permet d'accroître la résolution spatiale d'analyse et l'étendue de la zone analysée, tout en réduisant le temps nécessaire à la couverture de cette étendue. C'est un atout important pour des missions d'exploration à caractère opérationnel et/ou coûteuses.

On notera ici que la séquence de tir est généralement opérée par une unité de commande, à partir de laquelle l'opérateur détermine tous les paramètres d'utilisation de l'appareil, dont en particulier : le mode d'utilisation de la source laser (notamment le nombre voire la cadence de tirs), le mode d'acquisition et de traitement des spectres, ainsi que le mode d'acquisition des images ou vidéos, et le séquencement de tout cela, etc.

Afin de ne pas mêler tous les spectres des différents points lors de la collecte, celle-ci peut se faire par séparation spatiale (chaque point de mesure a sa propre voie de collecte). Une alternative consiste à réaliser une séparation temporelle, qui peut se faire par exemple de la façon suivante : on tire sur la voie A, on collecte les spectres des différents tirs (un à un ou en moyennant selon la cadence d'enregistrement des spectres), puis on fait de même sur la voie B.

Cette capacité de réaliser un sondage selon une matrice de points prédéfinie trouve un intérêt particulier dans le cas de dispositifs portables, car cela permet le sondage rapide d'une zone relativement large avec une grande résolution spatiale, puisque les distances entre points de mesures sont fixées par la configuration du dispositif.

En effet, le motif des points de mesures est prédéfini par la conception des moyens optiques d'illumination. Les points d'analyse peuvent être répartis de diverses manières sur la cible à analyser, en ligne ou en quadrillage ou toute autre disposition souhaitable. En pratique, la distance entre deux points de

mesure voisins du motif est supérieure ou égale à la moitié du diamètre d'un faisceau laser incident. De préférence, la distance entre deux points de mesure voisins du motif peut être de l'ordre de 1 à quelques mm, ou plus ; elle peut être par exemple choisie entre 2 et 30 mm selon la résolution spatiale visée sur la cible. Selon le nombre de points d'analyse et leur espacement, on peut couvrir une zone d'analyse de surface variable autour quelques cm^2.

Dans le cas de tirs simultanés, la source laser est dimensionnée en tenant compte de la subdivision ultérieure du rayonnement (nombre de points de mesure simultanés que l'on souhaite obtenir sur la cible). Ceci afin d'assurer que la puissance de chacun des faisceaux lasers formés par les moyens optiques d'illumination est suffisante pour vaporiser la matière, générer un plasma à chacun des points d'analyse sur l'échantillon, et obtenir un rapport signal à bruit suffisant pour les espèces chimiques que l'on souhaite détecter, conformément aux besoins de la technique LIBS.

Chacun des différents faisceaux laser suit préférablement un chemin optique propre vers la cible, les faisceaux émergeant des moyens optiques d'illumination laser contenus dans la tête de mesure. On parle ainsi de « voie d'illumination » générant un faisceau laser pour former un point de mesure. Dans ce contexte, on peut prévoir au niveau de la tête de mesure un répartiteur de faisceau, système optique planaire, ou bien à base de composants optiques discrets ou de fibres optiques par exemple, permettant de constituer plusieurs voies d'illumination. On produit ainsi plusieurs faisceaux lasers (parallèles ou non), émergeant de la tête de mesure, et suivant chacun des chemins respectifs et distincts de la tête de mesure à la cible, pour former des points de mesure espacés par exemple de 2 à 30 mm.

Le nombre de tirs laser par point de mesure, et leur cadence, peuvent être adaptés aux besoins de l'analyse (intensité du plasma et rapport signal à bruit obtenu, détectivité des éléments chimiques que l'on cherche à analyser, concentration de la cible en éléments que l'on cherche à détecter, altération de la surface (poussière, pollution…), etc.). On peut profiter de l'onde de choc créée sur la cible par le faisceau laser, pour éliminer tout ou partie de la

poussière déposée sur la cible, ou pour analyser celle-ci indépendamment de la cible et distinguer leur composition chimique propre. On peut ainsi, en fonction du nombre de tirs lasers accumulés sur un point, distinguer la composition chimique de la surface de la cible de celle que l'on peut trouver un peu en dessous de celle-ci. En effet, selon les propriétés de la cible, la profondeur de pénétration du faisceau laser, après quelques centaines ou milliers de tirs, peut atteindre voire dépasser 1 mm.

Comme indiqué ci-avant, les voies d'illumination peuvent, selon les variantes, être illuminées séquentiellement ou simultanément. Le cas séquentiel est le plus simple à réaliser. Exemple : on tire sur la voie A, on collecte les spectres des différents tirs (un à un, ou en les moyennant selon la cadence des tirs et le besoin), puis on fait de même sur la voie B. Une alternative pour activer successivement chaque voie de mesure, consiste à jouer sur la direction du rayonnement laser source, modifiée à l'aide d'un moyen de déviation associé, par exemple un miroir mobile, en entrée d'un répartiteur de faisceau, pour amener celui-ci successivement vers chaque voie d'illumination de la cible. Comme indiqué, la collecte peut ensuite se faire en discriminant les spectres de chaque point de mesure par exemple par leurs dates d'enregistrement et le séquentiel (l'ordre) de déclenchement des tirs entre les différents points.

Pour le cas d'un tir simultané sur les différentes voies, les moyens optiques de collecte sont configurés pour permettre une discrimination spatiale de la lumière collectée. Dans le cadre de la présente invention, la notion de tir simultané est utilisée de manière antagoniste à « séquentiel ». Le tir est dit simultané lorsque les tirs lasers sont effectués en même temps, ou de manière au moins partiellement concomitante, sur au moins deux voies d'illumination. Ainsi, « simultané » est à interpréter de manière large, également synonyme de « en parallèle », et ne nécessite pas que les tirs soient initiés exactement en même temps ni de même durée. Le plus simple est néanmoins d'avoir une seule source laser générant les différents faisceaux de mesure en simultané.

Pour la collecte lors de tirs simultanés en plusieurs points, on peut employer une voie de collecte unique ayant un champ de visibilité couvrant

l'ensemble des points de mesure. Selon un mode de réalisation, cette voie de collecte comprend un groupe de fibres optiques accolées, chaque fibre recevant la lumière d'une sous région de la zone d'analyse comprenant un seul point d'analyse. Alternativement, on peut envisager des voies de collectes intégralement séparées spatialement, configurées pour associer une (seule) voie de collecte (et préférablement d'analyse spectrale) indépendante à un point de mesure (donc à un faisceau laser). Ceci garantit une meilleure isolation des signaux entre eux, mais alourdit les dispositifs de collecte et d'analyse spectrale par rapport aux solutions précédentes, rendant le système moins compact et plus complexe.

Le dispositif selon l'invention peut être conçu comme un instrument d'analyse fixe. Mais le présent dispositif sera préférablement réalisé comme un dispositif d'analyse portatif ou mobile, commandé par un opérateur ou autonome, la technique LIBS étant idéale pour les analyses de terrain, puisqu'elle permet une analyse in situ, rapide, sans contact, et sans préparation d'échantillon.

La forme concrète que prendra le dispositif pour un usage mobile dépend du domaine d'application et du type d'usage, qui peuvent être variés, sur Terre, dans l'air ou encore sur une autre planète. Pour une analyse de terrain, le dispositif peut comprendre un pistolet qui intègre au moins les composants optiques d'illumination de la cible et de collecte des rayonnements issus de celle-ci. Un tel pistolet est donc aisément maniable par un utilisateur sur tous types de terrains. Alternativement, le présent dispositif pourrait par exemple être réalisé comme un appareil de mesure de laboratoire portatif, avec porte-échantillon pour échantillons, prélèvements ou carottages (éventuellement associé à un convoyeur pour ceux-ci) ou encore à la manière d'un dispositif embarqué permettant des mesures à distance à partir du véhicule terrestre ou aérien d'exploration, sur lequel il est embarqué, comme c'est par exemple le cas pour « ChemCam » à bord de Curiosity sur Mars.

La source laser peut être adaptée du concept du laser Chemcam pour être compacte, robuste aux chocs et vibrations, et capable de fonctionner sur

une large gamme de température (par exemple -40/+40°C) sans régulation thermique, et avec une consommation électrique limitée. Ce sont des atouts majeurs pour des applications portatives ou embarquées nécessitant compacité, légèreté, robustesse et faible consommation.

Le présent dispositif peut mettre en œuvre toutes les méthodes appropriées pour réaliser une analyse LIBS, en particulier pour l'analyse spectrale, la calibration, le traitement des données de mesure et l'identification élémentaire, afin d'aboutir à l'analyse chimique qualitative et/ou quantitative des cibles. Le présent dispositif n'est pas réservé aux analyses géologiques : il peut trouver application dans toutes sortes de domaines (comme décrit plus haut), pour l'analyse chimique d'échantillons solides, liquides ou gazeux.

L'analyse LIBS ne nécessite pas de préparation de cible ou d'échantillon, mais on pourra néanmoins, selon les cas, être amené à préparer la surface de la cible ou de l'échantillon, par nettoyage ou abrasion (pour aller plus loin que l'effet de l'onde de choc laser), ou bien retirer de la matière, par exemple par perçage, pour réaliser l'analyse plus en profondeur dans la cible ou l'échantillon par rapport à la profondeur accessible par accumulation de tirs laser.

On prendra avantageusement certaines dispositions constructives de nature à améliorer la robustesse du dispositif, notamment pour un usage sur le terrain, portatif ou mobile, et en particulier la robustesse de la source laser et de la tête de mesure qui doivent être stables dans les différentes conditions d'utilisation. Par exemple, la tête de mesure est avantageusement conçue sans pièces mobiles. Elle peut définir un chemin optique de guidage pour les faisceaux laser au moyen d'assemblage de différents éléments optiques fixes. Les moyens de guidage optique peuvent comprendre un guide d'onde par faisceau laser à acheminer pour générer un point de mesure respectif, en particulier à base d'éléments optiques fixes, de préférence conçus à partir d'un ou plusieurs éléments choisis parmi : fibres optiques, coupleurs à fibres optiques, miroirs, lentilles, lames dichroïques, cubes séparateurs, et guides planaires.

On peut, par exemple, prévoir dans la tête de mesure la séparation du rayonnement laser en 2 ou plusieurs faisceaux, au moyen d'un coupleur à fibre optique ou en optique intégrée.

L'alimentation du dispositif d'analyse peut se faire par branchement filaire à un réseau de distribution électrique, mais pour des versions portatives se fait de préférence par une batterie qui peut être rechargée par tout moyen approprié : réseau électrique, moteur thermique, panneaux solaires...

Le présent dispositif intègre avantageusement un module d'imagerie, en particulier un module d'imagerie couleur à haute résolution qui permet de prendre des photographies de la zone d'analyse, avant et après l'impact laser, voire des vidéos de la séquence d'analyse. La combinaison image / analyse chimique est très utile pour le géologue, par exemple. Elle lui permet de connaître le contexte de l'analyse : reconnaître le type de roche ou de sol analysé, identifier la présence éventuelle d'inclusions, voir s'il y a de la poussière sur la zone analysée (et, sur Terre, des végétaux).

Le dispositif d'analyse LIBS peut être complété par des moyens d'analyse complémentaires, par exemple un spectromètre Raman qui peut bénéficier des mêmes moyens d'illumination et de collecte, ou d'une voie d'illumination spécifique, l'irradiation de l'échantillon étant faite aux longueurs d'ondes désirées avec la source laser (par exemple avec doublage de sa fréquence nominale pour la voie Raman pour gagner en compacité), ou une autre source laser.

Le présent dispositif d'analyse LIBS peut être embarqué sur un véhicule d'exploration terrestre ou aérien, par exemple, pour se rendre ou se déplacer sur un site d'exploration. Ce véhicule peut être un robot mobile sur le sol et/ou dans l'air et commandé à distance, ou se déplaçant de façon pré-programmée ou autonome. A titre d'exemple on peut citer un véhicule terrestre commandé à distance (voiture ou rover d'exploration), un drone, un ballon à gaz, etc. Le véhicule comprend de préférence des moyens pour se mouvoir sur le sol, ou dans l'air, et se stabiliser devant, contre, ou au-dessus de la zone d'analyse, afin d'assurer une stabilité de la ligne de visée pour les tirs laser, la collecte de spectres et la prise d'images. Cette stabilité est nécessaire le temps de l'analyse (quelques secondes à quelques dizaines de secondes pour la partie illumination LIBS, quelques dizaines de secondes à quelques minutes maximum pour une séquence complète incluant les analyses spectrales et la prise d'images).

Associer le présent dispositif d'analyse LIBS à un robot mobile apte à se déplacer sur le sol (équipé de roues, chenilles ou autres) ou dans l'air, est intéressant par exemple lorsqu'un opérateur ne peut être présent ou suffisam-

ment proche du site : zones dangereuses ou difficilement accessibles, exploration spatiale, etc.

Toutefois, la télécommande à distance de tels robots reste complexe et nécessite la plus grande précaution pour ne pas endommager le robot et son équipement (et pour veiller à maîtriser le déplacement du robot). Dans le cas du rover Curiosity qui explore Mars depuis le 6 août 2012, son pilotage est assuré par une importante équipe d'humains, veillant ensemble au choix de la route empruntée par le rover et des sites analysés, à la sécurité du rover et des instruments, et à remplir les objectifs scientifiques de la mission. Mais l'état nécessairement limité des connaissances du terrain impose la plus grande prudence dans les déplacements, si bien que certaines zones restent inaccessibles notamment à cause du relief. La démarche d'analyse géologique ne peut en aucun cas être large et exhaustive, et des cibles potentiellement intéressantes peuvent être ignorées sur le passage.

Comparativement à un robot au sol, un drone a l'avantage de pouvoir survoler les obstacles du terrain, ce qui permet d'amener le dispositif d'analyse dans des endroits inaccessibles pour un rover. Un drone pourra également prendre des mesures sur des parois inclinées ou verticales peu ou non accessibles par d'autres moyens.

Dans le présent texte, on désigne par « drone » tout aéronef piloté à distance circulant sans aucune personne à bord, et généralement apte à embarquer une charge. Pour certaines applications de proximité, le vol peut se faire en vue directe par un opérateur au sol (le pilote à distance), via le système de commande et de contrôle au sol. Pour des explorations hors vue, le drone évolue de préférence de manière « automatique », c'est-à-dire que son évolution en vol a été programmée par quelque moyen que ce soit avant le début du vol, et/ou est mise à jour pendant le vol, et que tout ou partie du vol s'effectue sans intervention directe de l'opérateur, sauf exception ou mode de commande de secours.

Pour réaliser des mesures en vol, le drone présente une capacité de vol stationnaire, c'est-à-dire peut être contrôlé de manière à conserver une position

de vol sensiblement immobile par rapport au sol.

La combinaison drone / dispositif d'analyse LIBS permet une couverture suffisante à l'échelle de sites intéressants sur le plan géologique, que ce soit sur notre planète ou sur une autre, et répond aux critères suivants :

- accès rapide ;
- mobilité importante ;
- capacité à accéder à des zones peu ou pas accessibles pour l'homme, ou bien dangereuses pour lui ;
- capacité de couvrir de multiples zones ou des zones de taille importante, dans une même campagne d'analyse terrain, pour tenir compte de la variabilité des terrains ;
- une flexibilité permettant de couvrir tous types de terrains (sol, air, terrains accidentés, etc.).

Selon un autre aspect, l'invention propose donc un drone embarquant le présent dispositif d'analyse LIBS, ce qui permet de démultiplier les capacités d'analyses in-situ et la quantité de cibles et/ou d'échantillons sélectionnés et analysés, le drone étant capable d'effectuer des missions de reconnaissance, exploration et analyses géologiques in-situ sur des terrains plus grands que ceux couverts par un géologue humain ou un rover classique, voire plus accidentés ou difficiles d'accès.

De préférence, pour réaliser une campagne de mesure, l'ensemble drone /analyseur LIBS est équipé de moyens pour lui permettre :

- de réaliser (de façon automatique ou semi-automatique) un repérage visuel à large échelle pour analyser un site et déterminer des zones d'intérêt, en utilisant par exemple une caméra à grand champ ;
- puis de réaliser (de façon automatique ou semi-automatique) un repérage plus focalisé, pour analyser des zones du site et des cibles d'intérêt, en utilisant par exemple une caméra à champ plus réduit mais à plus haute résolution ;

- puis d'effectuer (de façon automatique ou semi-automatique) des analyses de composition du sol ou des cibles choisies ;
- et éventuellement de collecter quelques échantillons intéressants pour les ramener à la base ou en laboratoire, pour des analyses plus poussées, par d'autres techniques.

Pour certaines campagnes de mesures, on pourra prévoir un montage du présent dispositif d'analyse LIBS sur le drone, de sorte à autoriser son découplage, afin de déposer le dispositif d'analyse LIBS sur un site de mesure. Dans un tel cas, le dispositif d'analyse LIBS peut être monté sur un mini-robot mobile (type rover), transporté par le drone.

Le drone permet le déplacement aérien sur Terre, sur Mars ou autre. Après atterrissage, le mini-robot mobile équipé du présent dispositif d'analyse se sépare du drone pour une exploration au sol, et revient au drone à l'issue de la campagne. Le robot est de préférence autonome, et dans le cadre d'une exploration en plusieurs phases, peut rentrer au drone (pour se recharger, communiquer des informations ou ses données collectées) entre chaque phase, ou simplement enchainer les différentes phases et retourner au drone après la dernière phase.

Dans le cadre d'une exploration planétaire robotique (comme l'exploration de Mars par exemple), avec un rover d'envergure (type Curiosity), on peut envisager l'association d'un rover principal équipé d'instruments d'analyse géologique pointus, et d'un drone équipé de caméras de reconnaissance et d'un mini instrument LIBS installé à son bord ou détachable via un mini-atterrisseur ou rover (annexe). Cette association permettrait une exploration plus large autour du rover principal, et d'accroître ainsi la zone couverte par la mission, et la capacité à sélectionner les zones les plus intéressantes avant de faire intervenir le rover principal/laboratoire. Ceci permettrait d'accroître sensiblement l'efficacité et la durée de vie de la mission. Le rover principal d'exploration sert à :

- transporter le drone sur le site d'exploration via un autre véhicule pour les très longues distances (transnationales, transcontinentales, transo-

céaniques, ou pour l'exploration d'une autre planète),

- stocker et recharger le drone lors des phases de non-utilisation
- transmettre les données collectées par le drone vers la terre, transmettre au drone des données, commandes ou programmes envoyés par la Terre
- et faire des analyses plus approfondies du site ou des échantillons éventuellement rapportés par le drone.

Dans ce cas, le drone est un assistant, plus léger et beaucoup plus mobile, du rover d'exploration, mais contenant moins d'instruments (seulement imageurs de reconnaissance et exploration, spectromètre LIBS ou Raman, et éventuellement une pince pour la collecte d'échantillons, en vue d'une analyse plus approfondie par le rover). Ceci peut être éventuellement combiné avec le cas précédent, d'un drone portant un mini-robot. Des dispositifs miniatures, utilisés en téléphonie mobiles et pour les mini-drones d'imagerie terrestre, peuvent être utilisés pour les équipements nécessaires au drone (alimentation, motorisation, localisation, navigation et imagerie notamment…).

Outre les exemples de géologie terrestre ou spatiale, la combinaison du présent dispositif d'analyse LIBS avec un robot mobile (roulant ou aérien par exemple) peut trouver application dans une variété de circonstances, par exemple :

- restauration de monuments historiques : l'exploration du chantier par un robot autonome (ex. quadri-rotor) équipé du présent analyseur évite les échafaudages, et à un humain de porter l'appareil ou le pistolet LIBS à la main pour faire des analyses. Cela permet une couverture complète, régulière et précise de la surface entière du monument (cartographie + analyse) dans des délais plus courts.
- sites industriels ou zones de transport ou stockage à risques : analyse automatique de fuite ou évacuations de liquides ou de gaz, de déchets, etc. Exemples : inspection automatique de sites contenant des canalisations de gaz, ou de zones de stockage de produits dangereux, analyse de

sites d'exploitation d'hydrocarbures…

- analyse de rivières, pollution atmosphérique ou marine, etc.
- analyse de sites propices à l'exploration pétrolière ou minière.

Description des Figures

D'autres particularités et caractéristiques de l'invention ressortiront de la description détaillée d'au moins un mode de réalisation avantageux présenté ci-dessous, à titre d'illustration, avec référence aux dessins annexés. Ceux-ci montrent:

Fig.1 : un schéma de principe du dispositif d'analyse LIBS selon l'invention ;

Fig.2 : un schéma de principe du motif des points de mesure ;

Fig.3 : un schéma d'une variante de la tête de mesure ;

Fig. 4 : un schéma de principe de la construction interne de la tête de mesure de la Fig.3 ;

Fig. 5 : un schéma d'une autre variante du présent dispositif d'analyse;

Fig. 6 : un schéma illustrant le dispositif de la Fig.5 dans une version portable sac à dos ;

Fig. 7 : un schéma du présent dispositif d'analyse LIBS monté dans un drone ;

Fig. 8 : une vue de dessus du présent dispositif d'analyse LIBS monté sur un quadri-rotor ;

Fig. 9 : une vue de face de la Fig.8 ;

Fig. 10 : un diagramme d'une variante de processus de mesure du présent dispositif d'analyse LIBS associé à un drone ;

Fig.11 : a) schéma de principe d'une tête de mesure conformément à un autre mode de réalisation, et b) motif des points de mesure correspondants sur la cible.

Description détaillée d'au moins un mode de réalisation

1. Principe général du présent dispositif d'analyse

La figure 1 illustre un schéma de principe d'une variante du présent dispositif d'analyse 10, lequel comprend :

une source de rayonnement laser 12 ;

une tête de mesure, désignée généralement 14, comprenant :

- des moyens optiques d'illumination (ou d'irradiation) aptes à diriger le rayonnement laser sur un objet 15 à analyser selon la technique LIBS ; et
- des moyens optiques de collecte pour recevoir/capter le rayonnement (la lumière du plasma) émis par la cible suite aux tirs laser.

Le signe de référence 18 désigne un système d'analyse spectroscopique des signaux optiques captés. Un premier câble de transmission 20 à fibre optique est prévu pour transmettre le rayonnement laser de la source 12 vers la tête de mesure 14. Un deuxième câble de transmission 22 à fibre optique est prévu pour transmettre la lumière collectée par les moyens optiques de collecte vers ledit système d'analyse spectroscopique 18.

On appréciera que les moyens optiques d'illumination sont conçus pour diriger, et préférablement focaliser, au moins deux faisceaux laser 24 séparés vers la cible, de sorte à former au moins deux points d'analyse 26 séparés spatialement celle-ci, positionnés (répartis) selon un motif prédéfini. Les au moins deux points d'analyse 26 sont positionnés dans le champ de vision des moyens de collecte (c'est-à-dire dans la zone qui tombe dans l'angle d'ouverture des moyens de collecte). Sur les Figs. 1 et 2 le champ de vision est matérialisé par le cercle en pointillés indiqué 28. La Fig.2 montre par exemple un motif à 2 points de mesure à la surface de la cible 16, obtenus par les deux faisceaux laser 24. Mais on pourrait également prévoir 3 faisceaux laser séparés, et le troisième point de mesure correspondant serait par ex. le point indiqué 26' sur la Fig.2.

Les caractéristiques (notamment longueur d'onde et densité d'énergie) des faisceaux laser 24 sont adaptées pour chauffer la matière, vaporiser une petite quantité de matière et créer un plasma à chacun des points d'analyse 22. L'analyse spectroscopique de la lumière de ce plasma permettant l'identification des éléments chimiques constituant la matière de la cible, conformément à la technique LIBS.

La lumière émise par le plasma produit par les impulsions laser à la surface de la cible, au niveau de chaque point d'analyse 26, est donc captée par les moyens optiques de collecte et transmise vers le système d'analyse spectroscopique 18 (comprenant en général au moins un spectromètre associé à un détecteur). Le spectre obtenu (spectre LIBS) décrit les espèces chimiques qui composaient le petit morceau de cible sublimé. Le spectre LIBS, ou une partie de celui-ci, peut être comparé à des valeurs de référence dans une base de données pour identifier ces espèces.

La source laser peut être toute source adaptée pour fournir un ou des faisceaux laser, dont la densité de puissance pour chaque point de mesure permet de vaporiser et ioniser une portion de matière à la surface de la cible (il faut typiquement une densité de 1 GigaWatt/cm² à une longueur d'onde voisine de 1064 nm, avec des impulsions courtes de 5 à 8 ns).

Un exemple de laser approprié est un laser à solide pulsé, pompé par diodes, tel qu'un laser Nd :YAG émettant à 1064 nm.

Un autre type de source laser possible est une source laser à solide Nd : KGW telle que fabriquée la société Thalès Laser (France) en collaboration avec le CNES, pour l'instrument ChemCam installé sur le rover Curiosity pour la mission martienne Mars Science Laboratory (MSL). Il s'agit d'une source laser stable sur une large plage de température (-30/+30°C), qui ne nécessite pas de refroidissement actif, et apte à produire une énergie de l'ordre de 30 à 40 mJ à 1067 nm, avec des impulsions de 5 à 8 ns, et une cadence allant de 1 à 10 Hz.

Le laser Chemcam est résistant aux vibrations, aux chocs, aux cyclages thermiques journaliers et saisonniers, et aux radiations de la mission MSL. Pour plus de détails sur ChemCam, son laser, les moyens optiques d'illumination et

de collecte, et l'électronique associée, on peut se référer à l'article paru dans le périodique Space Science Reviews, no. 170, 2012 : *The ChemCam Instrument suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Science objectives and Mast Unit par Maurice, S., Wiens, R., Saccoccio, M.*

La technique d'analyse LIBS, qu'il s'agisse du choix du laser, de l'analyse spectrale de la lumière du plasma, du traitement des données spectrales, et de la calibration, est largement connue et ne sera donc pas décrite plus avant ici. L'homme du métier est à même de sélectionner les composants et méthodes appropriés pour la mettre en œuvre dans le cadre de la présente invention.

De manière générale, le dispositif inclut une unité de commande, indiquée 17 en Fig.1, qui permet de mettre en œuvre la mesure LIBS et commande par ailleurs le fonctionnement du dispositif 10. Comme on l'aura compris, le présent principe de mesure implique une pluralité de tirs sur différents points de mesures. Au niveau de l'unité de commande, cette méthode multi-tirs est mise en œuvre par le dispositif de manière automatisée (que se soit en séquentiel ou parallèle), alors que l'utilisateur ne donne qu'une seule instruction de procéder à une mesure (et non pas autant d'instructions de mesure que de faisceaux lasers).

De préférence, la source laser 12 et le spectromètre 18 sont réunis dans un même caisson, boitier ou support, avec l'unité de commande 17, que l'on appellera ci-après groupe laser/spectromètre 19, ou encore groupe L/S 19.

2. Variantes de réalisation de la tête de mesure

La tête de mesure 14 est illustrée en perspective en Fig.3, dans une variante comprenant un boitier parallélépipédique. Sur la face avant 30, on a symbolisé :

- les zones d'émission des faisceaux laser 24, à partir desquelles émergent les faisceaux laser, qui sont indiquées par les cercles 32.
- les moyens de collecte qui sont matérialisés par le cercle 34.

La tête 14 comporte ici deux capteurs d'imagerie indiqués 36 et un cap-

teur de distance 38 (télémètre). L'un des capteurs d'imagerie peut être un capteur couleur haute résolution (ou HD) et l'autre un capteur d'imagerie grand champ.

Le rayonnement laser est transmis par le premier câble 20 depuis la source 18 à la tête de mesure 14. Le rayonnement laser est guidé, orienté et/ou distribué dans la tête de mesure 34, de sorte à faire émerger de celle-ci plusieurs faisceaux laser selon des directions respectives prédéfinies, pour fournir des points d'analyse spatialement séparés sur l'échantillon, selon le motif prédéfini. Ainsi, la tête de mesure comprend des éléments optiques internes pour diriger le rayonnement laser sur différentes voies, chaque voie permettant la formation d'un faisceau laser suivant, à la sortie de la tête de mesure, un chemin optique propre pour irradier l'échantillon au niveau du point de mesure désiré, selon le motif. Les faisceaux laser peuvent avoir des directions parallèles les uns aux autres, ou pas.

De préférence, le premier câble de transmission 20 comprend une fibre optique pour chacun des faisceaux laser 24 émis par la tête 14. On travaille avantageusement avec une source laser unique, en série avec un diviseur de faisceau, à partir duquel les faisceaux indépendants sont envoyés dans les fibres respectives. Cette solution est préférée pour des raisons de compacité, de poids et de simplicité.

Alternativement, on pourrait avoir une source laser par faisceau laser à émettre au niveau de la tête de mesure 14.

Alternativement encore, on pourrait employer une seule fibre optique qui envoie le rayonnement vers la tête de mesure, et diviser le rayonnement dans la tête de mesure. Le montage de la source est alors très simple, mais il faut intégrer davantage d'éléments optiques dans la tête de mesure.

Dans les variantes représentées, le premier câble 20 comprend donc deux fibres optiques portant chacune le rayonnement laser pour former le faisceau 24 respectif. Le câble 20 arrive par exemple à l'arrière 38 de la tête 34 et les fibres sont raccordées aux moyens d'illumination.

Les moyens d'illumination peuvent être conçus de toute manière appro-

priée pour guider le rayonnement laser, depuis la fibre optique à la face avant de la tête, et faire émerger les faisceaux laser 24 dans les directions voulues. On utilisera de préférence des moyens d'illumination sans pièces mobiles.

Un exemple de réalisation de la tête de mesure 14 est illustré schématiquement à la Fig.4. Le premier câble 20 comprenant deux fibres optiques 20a, 20b arrive à l'arrière de la tête de mesure 14 ; les extrémités des fibres optiques 20a, 20b sont connectées à l'arrière de la structure optique de manière appropriée. Plutôt qu'une arrivée avec deux fibres 20a, 20b, on pourrait utiliser une fibre unique arrivant à l'entrée de la tête 14 sur un coupleur (utilisé en diviseur) de faisceaux à fibres optiques, ou en optique intégrée. Un jeu de fibres optiques internes 23 (ou d'autres éléments optiques) est agencé de sorte à définir un chemin optique menant le rayonnement laser issu de chaque fibre 20a, 20b, à l'intérieur de la tête 14, et faire émerger par la face 30 un faisceau laser 24 selon une direction prédéterminée avec l'écartement choisi entre faisceaux 24.

Les rayonnements laser apportés par les fibres optiques 23 sortent donc par la face avant 30 de la tête de mesure 14, selon des directions prédéterminées, formant les faisceaux 24, afin de frapper l'échantillon 15 au niveau des deux points de mesure 26 dans une zone coïncidant avec le champ de vision 28 des moyens de collecte 34. Sur la Fig.4, les extrémités des fibres internes 23 sont matérialisées par des rectangles 23_1 qui englobent les moyens de fixation de ces fibres à l'arrière de la face avant et, le cas échéant, des éléments optiques de focalisation.

Les moyens de collecte 34 sont, de préférence, simplifiés au maximum en amenant l'extrémité du deuxième câble 22 à fibre optique au plus près de la face avant 30 de la tête de mesure 14.

Le câble 22 peut comprendre une ou plusieurs fibres optiques. Une seule fibre optique est suffisante pour une discrimination purement spectrale de la lumière collectée ; dans cette solution les signaux en réponse sont moyennés mais permettent l'identification des différentes raies spectrales, et donc l'analyse élémentaire de l'échantillon.

On peut alternativement utiliser un câble multifibre, ce qui permet en outre

une discrimination spatiale des rayonnements collectés (une fibre par point de mesure).

Des fibres monomodes ou multi-modes peuvent être employées.

Il est fortement souhaitable que la lumière du plasma à capter soit focalisée sur les moyens de collecte 34. On pourra par exemple adjoindre des lentilles à l'extrémité de la/des fibre(s), par exemple un doublet de lentilles. Alternativement, on peut employer des fibres lentillées, si la distance de travail est appropriée, et selon l'agencement souhaité. Comme on le sait, une fibre lentillée est une fibre dont l'extrémité est sphérique, formant ainsi une lentille permettant une focalisation de faisceau (au lieu de le laisser naturellement diverger). Elle peut aussi, inversement être utilisée pour l'illumination, à condition que sa distance de travail ne soit pas une gêne pour l'illumination laser et/ou l'imagerie.

A la Fig.4, le signe de référence 40 symbolise le doublet de lentilles qui permet de focaliser la lumière plasma sur la zone de cœur de l'extrémité de fibre 42.

Selon les variantes, on pourra combiner la technique LIBS au Raman. On pourra par exemple prévoir l'émission d'un faisceau laser supplémentaire à partir de la tête (exemple faisceau laser LIBS doublé en fréquence) pour une interrogation Raman de la cible. Ce faisceau laser additionnel est séparé des autres, et frappe la cible en un point d'analyse spatialement séparé des autres, prévu dans le motif des points d'analyse.

La collecte du rayonnement issu de l'interrogation Raman se fait par les moyens de collecte 34, mais l'analyse spectrale est normalement réalisée dans un spectromètre dédié.

En référence aux Figs.1-3, si l'on travaille avec 2 faisceaux laser en LIBS, l'interrogation Raman peut se faire par le 3ème faisceau laser 24, qui frappe l'échantillon à 26'. Le rayonnement laser pour le Raman peut provenir de la même source 12, en prenant par exemple la 2^{e} harmonique à 532 nm dans le cas d'une source à 1064 nm. Le rayonnement à 532 nm peut être extrait au niveau de la source par un assemblage optique approprié, comprenant par

exemple un diviseur de faisceau et un miroir à 532 nm.

La technique Raman est bien connue, ainsi que sa combinaison avec la technique LIBS. L'homme du métier est à même de conditionner le rayonnement laser de manière appropriée, ainsi que d'analyser le rayonnement mesuré.

Une autre variante de réalisation de la tête de mesure est présentée à la Fig.11 a). Cette tête de mesure 60 comprend 4 voies d'irradiation (3 pour l'analyse LIBS, notées 62, et une pour le Raman, notée 62') et une voie de collecte centrale 64. Les 4 voies d'irradiation 62, 62' sont disposées en carré. Les 3 voies laser 62 sont formées de manière similaire à la variante de la Fig 4. Le rayonnement laser arrive par fibre optique et est réparti sur 3 chemins optiques internes formés par des fibres optiques qui constituent les voies d'illumination laser pour l'interrogation LIBS. Le rayonnement laser requis pour l'analyse Raman (dont la longueur d'onde est différente - ex. 532 nm) est de préférence amené directement par fibre optique depuis la source laser. Les voies d'illumination 62, 62' sont préférablement positionnées pour des faisceaux laser dans des directions parallèles, formant alors sur l'objet à analyser un motif matriciel de 4 points de mesure dont l'espacement est le même que celui des faisceaux émergeant de la tête de mesure.

La Fig. 11 b) montre donc les 4 points de mesure obtenus sur l'échantillon : 3 points de mesure pour l'interrogation LIBS, indiqués 66, et un point correspondant à l'interrogation Raman, indiqué 66'. Tous les points de mesure sont localisés dans le champ de vision 68 des moyens de collecte.

La collecte peut se faire de manière simple avec une seule fibre optique en position centrale, et en opérant les tirs de manière séquentielle sur les différentes voies, ce qui permet de discriminer les points de mesure simplement sur base temporelle, à condition que la collecte soit bien focalisée sur les points de mesure.

Toutefois, dans la présente variante la voie de collecte centrale est conçue pour permettre la discrimination spatiale de la lumière collectée lors de tirs simultanés sur l'ensemble des voies 62, 62'. Pour ce faire, la voie de collecte

centrale 64 comprend un assemblage de 4 fibres optiques 64_1...64_4 qui permettent ainsi la segmentation du champ de vision 68 en quatre régions 68_1...68_4 couvrant chacune un point de mesure respectif.

3. Exemple de réalisation du présent dispositif dans une version autonome et portable

Un mode de réalisation du présent dispositif d'analyse autonome et portatif 200 est illustré à la figure 5. La tête de mesure 14 est conçue telle que décrit section 2 ci-dessus, en relation avec la Fig.4, et est donc couplée à une source laser 212, installée dans un groupe L/S 219, au moyen d'un premier câble à fibres optiques 220. La tête de mesure 14 est apte à générer deux (ou plus) faisceaux laser 24 séparés spatialement et focalisés sur l'échantillon 15 à analyser, de sorte à former plusieurs points d'analyse.

La source laser 212 est adaptée au système optique de sorte que sa puissance soit suffisante pour chauffer la matière au point d'incidence de chacun des faisceaux laser 24, vaporiser la matière et créer un plasma pour permettre une analyse élémentaire par la technique LIBS.

Comme expliqué ci-avant, la lumière des plasmas créés au niveau des points de mesure est collectée par les moyens de collecte 34 et transférée vers le groupe L/S 219 via le deuxième câble 222, en vue de l'analyse spectrale au moyen d'un spectromètre LIBS 218. Le spectromètre LIBS 218 peut être basé sur toute technologie appropriée, en particulier un prisme ou un réseau de diffraction. Le spectromètre LIBS réalise la dispersion spectrale du rayonnement plasma récolté, l'acquisition de celui-ci étant effectuée au moyen d'un détecteur 250 de photons vectoriel ou matriciel, par exemple un détecteur CCD ou iCCD (intensified Charge Couple Device). Le groupe L/S peut contenir plusieurs spectromètres dans le but d'analyser plusieurs gammes de longueurs d'onde et accéder ainsi à une gamme d'éléments chimiques plus étendue.

Le signe de référence 252 désigne un spectromètre Raman recevant également le rayonnement issu de l'échantillon suite à une interrogation de celui-ci avec le rayonnement laser à une longueur d'onde appropriée (comme expliqué

au 2), ou avec une autre source lumineuse. Le spectromètre Raman 252 peut être basé sur toute technologie appropriée. Le spectromètre Raman réalise la dispersion spectrale du rayonnement plasma récolté, l'acquisition de celui-ci étant effectuée au moyen d'un détecteur de photons 254 vectoriel ou matriciel, par exemple un détecteur CCD ou iCCD.

Les capteurs d'imagerie 36 équipant la tête de mesure 14 permettent l'acquisition d'images de la zone d'analyse courante de la cible avant et/ou après l'impact laser ou la captation vidéo de la séquence d'analyse. Un câble 258 relie les capteurs d'imagerie 36 au groupe L/S, par exemple à un processeur d'image 260.

Le télémètre 38 de la tête de mesure 14 permet de déterminer la distance à la cible, et peut en outre servir dans une boucle de pilotage automatique lorsque la tête est montée mobile, ou bien d'entrée dans le système de réglage automatique de la focalisation des imageurs ou de l'appareil de mesure (LIBS ou Raman). En particulier, la distance mesurée par le télémètre peut être utilisée comme élément déclencheur de la mesure, lorsque la tête de mesure est à la bonne distance.

Une unité de contrôle informatique 226 comprenant un microprocesseur est prévue pour gérer le dispositif 200, en particulier mettre en œuvre la mesure conformément à la technique LIBS, essentiellement opérer les tirs laser, collecter le rayonnement suite à l'interrogation laser, acquérir les spectres et les images. L'analyse des spectres peut se faire dans le dispositif, ou bien ceux-ci peuvent être stockés (DATA 261) et/ou transmis pour une analyse dans un autre système informatique plus puissant. Le signe de référence 262 indique un module de communication pour la communication à distance avec le dispositif 200, avec l'interface séparée 254', et l'échange de données.

Une interface utilisateur 254, 254' communique (avec ou sans fil) avec l'unité de contrôle 226 pour permettre à un utilisateur de commander le dispositif d'analyse 200.

Un module de refroidissement 256 est prévu, en particulier pour le refroidissement de la source laser 212, pour assurer son fonctionnement optimal et

sa stabilité (besoin dépendant de la source laser choisie).

Un module d'alimentation 258 fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du dispositif 200. Il comprend de préférence une batterie qui peut être rechargée par raccordement au réseau ou à un générateur. Dans des missions d'exploration spatiale ou autres où la fourniture en énergie électrique est limitée, le générateur peut comprendre des panneaux solaires.

Selon les variantes et surtout selon les applications désirées, on pourra prévoir dans le dispositif 200:

- un télémètre 264 ;
- un capteur GPS 266 utilisé par l'unité de contrôle pour la recherche, la localisation et le ciblage.

Une caméra vidéo 268 fournit des images couleur dynamiques en temps réel de la zone à analyser, ou plus généralement des zones qui présentent un intérêt. Une telle caméra 268 peut aussi être utilisée pour catégoriser les cibles observées en fonction de leur morphologie, couleur, forme ou hétérogénéité par exemple. La caméra vidéo 268 peut utiliser la lumière ambiante ou une lumière artificielle, par exemple celle du laser, pour éclairer la zone cible. On peut envisager d'embarquer une caméra grand champ pour la reconnaissance du site et une caméra à haute résolution et champ plus réduit pour l'identification de cibles et de la zone d'analyse.

4. Exemples d'applications – unité portable

Comme expliqué ci-dessus, le présent dispositif a été conçu pour un usage sur site/sur terrain.

Le dispositif peut être monté à bord d'un véhicule (terrestre, aérien, …) conduit par un utilisateur (voiture, chariot, etc.) ou commandé à distance (véhicule roulant radiocommandé, drone…).

Le groupe L/S 19 est généralement installé en sécurité dans le véhicule, alors que la tête de mesure 14 peut être par ex. positionnée sur un bras fixe ou

mobile (robotisé), grâce à la facilité apportée par la fibre optique assurant la communication entre le groupe laser/spectromètre et la tête de mesure, ainsi qu'à la compacité et légèreté de cette dernière.

On peut aussi envisager des versions simplement portatives, puisque le groupe laser / spectromètre est peu volumineux, et la tête de mesure peut être intégrée dans une sorte de pistolet qui est tenu à la main par l'utilisateur. Le groupe laser peut être installé dans un caisson commun, muni par ex de poignées. On pourra également l'installer dans une valise ou un sac.

La Fig.6 illustre un exemple de réalisation, dans lequel le groupe laser / spectromètre 19 (de la Fig.1) est installé dans un sac à dos 300, et la tête de mesure 14 est intégrée dans un pistolet 302. Un câble 304 regroupe les fibres optiques transportant le rayonnement laser et la lumière collectée, et les autres câbles nécessaires pour l'imagerie et la télémétrie le cas échéant.

Un autre intérêt du format pistolet est de pouvoir définir une distance de mesure. Dans l'exemple illustré, la tête de mesure est en fait installée dans le boitier 306 en forme de pistolet, et la face avant 14_1 de la tête de mesure 14 est tournée vers l'ouverture 308 du boitier. Par conception, on peut fixer la distance D entre la face avant de la tête de mesure et le bord avant 310 du pistolet (il s'agit donc d'un bord avant de profondeur D).

Dans ce contexte, pour faciliter la mesure, on peut faire coïncider sensiblement la distance focale des moyens d'illumination et/ou de collecte avec cette distance D. Ainsi, en plaquant le bord avant 310 du pistolet 302 contre l'objet à analyser, on se place directement à la distance focale, optimisant l'énergie laser appliquée à l'objet analysé ainsi que la collecte de la lumière des plasmas générés.

5. Exemples d'application avec des drones

En référence à la Fig. 7, le dispositif d'analyse LIBS 200 décrit ci-avant (section 3) est combiné à un drone (aérodyne télécommandé ou se déplaçant de façon pré-programmée ou « intelligente »), pour réaliser des mesures le long

d'une falaise rocheuse, d'une façade de monument historique ou dans un site industriel ou d'exploration ou exploitation pétrolière. Le dispositif d'analyse 200 est donc embarqué par le drone 400, qui permet de positionner rapidement le dispositif d'analyse 200 le long de la falaise 402, à tout endroit souhaité. Pour chaque mesure, le drone 400 est opéré en mode stationnaire.

Les drones multi-rotors sont de plus utilisés car ils présentent l'avantage combiné d'une grande simplicité de conception, d'une grande facilité d'utilisation et d'application, et surtout sont à coûts qui restent abordables, en utilisant des technologies miniatures et modernes notamment utilisées dans la téléphonie mobile.

Les zones de mesure peuvent être décidées par un opérateur dans un mode à vue. Alternativement, l'ensemble des zones de mesure peuvent être décidées à l'avance, et le drone suit alors un plan de vol, en mode automatique, ce dernier évoluant vers chacune des zones de mesure prédéfinies. Dans une version encore plus élaborée, le drone peut se mouvoir de façon « intelligente », c'est-à-dire auto-adaptative, à l'aide de ses divers capteurs embarqués et lois de vol prédéfinies.

Pour optimiser la campagne de mesure, on peut procéder à une reconnaissance préalable par le drone, qui va acquérir des images des différentes parties de la falaise, et faire une sélection humaine et/ou par traitement d'image, des différentes zones d'analyse à couvrir ensuite par l'analyse LIBS avec le drone.

Dans la variante de la Figure 7, le drone est du type hélicoptère. Le groupe L/S 219 est installé centralement dans le drone 400, pour les besoins d'équilibre. La tête de mesure 14 est déportée au moyen d'un bras 404 qui est fixé sous le corps/carénage 406 du drone 400 et s'étend horizontalement, au-delà du périmètre du carénage du drone et des pales. Cela permet au drone 400 d'approcher la tête de mesure 14 très près de la paroi. On peut envisager de mettre deux têtes de mesure en positions symétriques de part et d'autre du drone pour équilibrer celui-ci, doubler le nombre de points de mesures et/ou

constituer une voie de mesure redondante en cas de dysfonctionnement de la première.

Outre les moyens de navigation habituels à bord du drone, on utilisera par ex. un télémètre pour positionner le drone 400 à une distance prédéfinie de la paroi 402 pour effectuer les mesures. Ceci notamment dans un cas sans autofocus, ou à course de refocalisation limitée.

En pratique, le drone est préférablement opéré pour que, au moment de la mesure, la tête de mesure 14 soit au plus près de la paroi, par exemple entre 1 et 20 cm, voire en contact avec celle-ci. Ceci dépend des capacités de focalisation de la tête de mesure.

La Figure 8 illustre une variante dans laquelle le drone est un quadri-rotor 500. Il comprend classiquement quatre rotors de sustentation 502 portés par des bras 504 s'étendant à partir d'un corps central 503, les bras formant ainsi une croix. Afin d'éviter à l'appareil de tourner sur lui-même sur son axe de lacet, deux rotors 502 tournent dans un sens, et les deux autres dans l'autre sens, les rotors tournant dans le même sens étant placées aux extrémités opposées d'une branche de la croix. Un carénage 506 est fixé au corps central 503 et entour les rotors 502 (hélice+moteur).

Pour faire décoller un multi-rotor, il suffit d'appliquer une tension identique à chaque moteur (ils tournent alors tous à la même vitesse). L'augmentation de la vitesse permet le décollage et le positionnement en altitude.

Comme on le sait, les mouvements (lacet, roulis, tangage) sont ensuite obtenus en faisant varier les vitesses. Ainsi le nombre de paramètres de commande est dépendant du nombre de moteurs. Ces aspects de commande des drones multi-rotors sont largement connus par l'homme du métier et ne nécessitent pas davantage de développement ici.

Pour les mesures LIBS, le groupe laser/spectromètre 219 est installé dans le corps central 503, ou fixé sous celui-ci. La tête de mesure 14, peu volumineuse et de faible poids, peut quant-à-elle être fixée sur un côté extérieur du carénage 506. Si nécessaire, un contre poids peut être positionné à l'opposé, ou bien une seconde tête de mesure pour équilibrer le drone, tout en offrant soit

un doublement des points de mesure, soit une redondance à la tête de mesure.

Les exemples de drones présentés ci-avant ne sont pas limitatifs. Divers types de drones peuvent être employés, et seront sélectionnés selon la capacité de charge et l'autonomie désirées.

Des drones multi-rotors capables d'emporter une charge utile entre 6 et 10 kg, et ayant une autonomie entre 10 et 20 min sont déjà utilisés pour diverses applications, telles que pose de lignes haute-tension, sauvetage côtier... De tels drones sont tout à fait appropriés pour une utilisation dans le cadre de la présente invention.

En outre, le drone peut être équipé d'une pince au bout d'un bras robotisé, pour la collecte d'échantillons à analyser plus finement sur une base amenée sur site ou en laboratoire.

Dans certaines applications telles que la restauration de monuments, des mesures LIBS sont pratiquées pour analyser des revêtements. Des drones peuvent alors être employés pour prendre des mesures sur des façades, des voutes de cathédrales, ou des parois internes de bâtiments, sans l'usage d'échafaudage. A nouveau, la tête de mesure peut être placée sur le carénage ou au bout d'un bras ou d'une perche.

Dans ce genre d'application, pour s'affranchir du problème d'autonomie, on pourra tout à fait envisager un drone (électrique) alimenté par fil.

6. Exemple de séquence de mesure

De manière générale, le présent dispositif est opéré par une unité de commande, telle l'unité de commande 226 qui, gère en particulier la séquence de mesure / d'acquisition, c'est-à-dire le déclenchement du tir, la collecte du rayonnement plasma - LIBS, et l'acquisition d'images.

Une variante préférée d'un processus de mesure est illustrée à la Fig.10, dans le cadre de l'utilisation avec un drone.

L'étape 600 fait référence à la phase d'approche, pendant laquelle le

drone s'approche de la zone à analyser. Le positionnement dans cette zone d'analyse peut se faire à vue, ou par une information de caméra vidéo, ou bien sur la base d'un système de positionnement.

Tant que la zone d'analyse n'est pas atteinte, le processus reboucle sur l'étape 600, pendant le déplacement du drone.

La prise d'image (étape 602) avant le tir laser est facultative, mais elle peut être utile pour comparer la cible, avant/après tir laser, définir le contexte de l'analyse, et localiser précisément celle-ci.

Une fois la position atteinte (étape 604, « OUI »), la commande donne son ok pour procéder à une phase de tir. Avantageusement, la phase de tir comprend une phase de positionnement fin, qui vise à s'assurer de la focalisation de la tête de mesure 14. Pour un système à optique fixe de la tête de mesure, la position du drone est ajustée pour positionner la zone à analyser dans le plan focal du système optique, de sorte à optimiser la collecte du rayonnement plasma qui sera créé par l'interrogation laser. Cela peut se faire par une mesure de distance ou par télémétrie. Une fois la distance focale atteinte (symbolisé par un drapeau Focus=OK à l'étape 606), le tir est déclenché (étape 608).

Dans le cas d'un bloc autofocus, il n'est pas forcément nécessaire de mesurer la distance, mais le passage à l'étape de tir 608 peut être autorisé par un drapeau FOCUS=OK donné par le bloc autofocus.

Le système de collecte connecté au(x) spectromètre(s) entre en jeu pour collecter et acquérir les spectres du rayonnement plasma créé par le tir laser. L'unité de commande déclenche également l'acquisition d'une image post-tir (étape 612), de préférence au moyen des capteurs d'imagerie indiqués 36. On prévoira généralement un faible décalage entre le tir laser et l'acquisition, pour tenir compte du délai entre excitation et émission de la cible.

Il est clair que le tir comprend l'émission (en parallèle ou séquentiel) des aux moins deux faisceaux laser pour l'interrogation LIBS, et/ou le cas échéant le tir laser pour l'interrogation Raman. Si un tir Raman est effectué, la phase d'acquisition comprend alors l'acquisition du spectre Raman. Comme indiqué plus haut, selon que le tir est séquentiel ou en parallèle, on sépare de préfé-

rence les acquisitions relatives aux points de mesure, soit de façon temporelle (émission et collecte décalées sur les différents points), soit de façon spatiale (une voie de collecte distincte par point de mesure).

On notera encore que pour chaque point de mesure, les tirs laser et l'acquisition de la lumière plasma sont en pratique répétées un certain nombre de fois, par ex. quelques dizaines ou centaines de fois (tirs en rafale générant un spectre par tir). La lumière collectée est envoyée vers les spectromètres et moyens de traitement pour analyse. Selon les modes opératoires, chaque tir laser fournit un spectre, ou plusieurs tirs peuvent aboutir à une acquisition spectrale intégrée ou moyennée. On peut aussi accroître le nombre de tirs laser jusqu'à plusieurs milliers, afin de pénétrer plus profondément dans la cible et réaliser une analyse spectrale en fonction de la profondeur. Ceci peut permettre d'identifier des propriétés/compositions variables entre la surface et l'intérieur de la cible. Ce type d'utilisation nécessite une stabilité accrue des lignes de visée illumination/collecte.

Conformément à l'étape 614, les données relatives au tir, par ex. heure, date, coordonnées, spectres, images, sont alors transmises au sol ou à la base, pour dépouillement et analyse.

Revendications

1. Dispositif d'analyse LIBS comprenant
   - une source de rayonnement laser (12 ; 212)
   - une tête de mesure (14 ; 60) avec:
     - des moyens optiques d'illumination aptes à diriger au moins deux faisceaux laser (24) séparés vers une cible à analyser (15), de sorte à former au moins deux points de mesure (26 ; 66) séparés spatialement sur la cible, selon un motif prédéfini ; et
     - des moyens optiques de collecte de la lumière émise par interaction du rayonnement laser incident avec la cible, lesdits moyens optiques de collecte ayant un champ de vision (28 ; 68) dans lequel se trouvent lesdits au moins deux points de mesure (26 : 66) ;
   - au moins un spectromètre (218) pour analyser la lumière transmise par les moyens optiques de collecte et générer des données spectrales LIBS ;
   - un premier câble (20 ; 220) de transmission à fibre optique pour transmettre le rayonnement laser de la source de rayonnement laser vers la tête de mesure ;
   - un deuxième câble (22 ; 222) de transmission à fibre optique pour transmettre le rayonnement collecté par les moyens optiques de collecte vers ledit spectromètre.
2. Dispositif d'analyse LIBS selon la revendication 1, dans lequel les moyens optiques de collecte comprennent une voie de collecte (34) dont le champ de vision englobe les différents points de mesure créés par les faisceaux laser.
3. Dispositif d'analyse LIBS selon la revendication 1 ou 2, dans lequel les moyens optiques de collecte sont réalisés par une portion de fibre optique 42 fixée dans la tête de mesure à laquelle on associe préférablement une

optique de focalisation (40) pour focaliser la lumière collectée sur la face d'entrée de la portion de fibre optique.

4. Dispositif d'analyse LIBS selon la revendication 1, dans lequel les moyens optiques de collecte comprennent au moins deux voies de collecte (64_i) dont les champs de vision (68_i) sont appropriés pour couvrir l'ensemble de points de mesure (66), en particulier les moyens de collecte comprennent une voie de collecte ayant un champ de vision respectif par point de mesure, les voies de collecte étant de préférence regroupées centralement.

5. Dispositif d'analyse LIBS selon l'une quelconque des revendications précédentes, comprenant une unité de commande (17) configurée pour gérer l'analyse LIBS en opérant conjointement ou séquentiellement les tirs laser avec lesdits au moins deux faisceaux laser.

6. Dispositif d'analyse LIBS selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la tête de mesure (14) comprend au moins un module d'imagerie (36).

7. Dispositif d'analyse LIBS selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la tête de mesure (14) comprend au moins un moyen de mesure de distance (38) entre la tête de mesure et la cible afin de régler la distance de travail et optimiser la focalisation.

8. Dispositif d'analyse LIBS selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les moyens optiques d'illumination comprennent des moyens de guidage optique configurés pour guider le rayonnement laser issu du premier câble de transmission, et former et faire émerger de la tête de mesure lesdits faisceaux laser (24) séparés, de sorte à former sur la cible lesdits points d'analyse (26, 66) selon ledit motif prédéfini.

9. Dispositif d'analyse LIBS selon la revendication 8, les moyens de guidage optique comprennent un guide d'onde (23) par faisceau laser à acheminer pour générer un point de mesure respectif.

10. Dispositif d'analyse LIBS selon la revendication 9, dans lequel les guides d'ondes sont à base d'éléments optiques fixes, de préférence conçus à par-

tir d'un ou plusieurs éléments choisis parmi : fibres optiques, coupleurs à fibres optiques, miroirs, lentilles, lames dichroïques, cubes séparateurs, et guides planaires.

11. Dispositif d'analyse LIBS selon la revendication 8, 9 ou 10, dans lequel les moyens optiques d'illumination comprennent des moyens de focalisation pour focaliser les faisceaux laser sur la cible.

12. Système d'analyse LIBS mobile caractérisé en ce qu'il comprend un robot mobile et un dispositif d'analyse LIBS selon l'une quelconque des revendications précédentes embarqué sur ce robot mobile.

13. Système d'analyse LIBS mobile selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le robot mobile est piloté à distance par un opérateur au moyen d'une unité de commande et de contrôle ; et/ou configuré pour se mouvoir de façon pré-programmée et/ou auto-adaptative.

14. Système d'analyse LIBS mobile selon la revendication 13, dans lequel le robot mobile est un drone (400, 500) ayant une capacité de vol stationnaire.

15. Système d'analyse LIBS mobile selon la revendication 12, 13 ou 14, dans lequel la tête de mesure (14) est installée à l'extrémité d'un bras de mesure (404) s'étendant latéralement, la source laser et le(s) spectromètre(s) étant positionnés centralement dans le robot mobile, respectivement le drone.

16. Système d'analyse LIBS mobile selon l'une quelconque des revendications 12 à 15, dans lequel le robot mobile, respectivement le drone, comprend une pince de prélèvement.

17. Système d'analyse LIBS mobile selon l'une quelconque des revendications 12 à 16, dans lequel

- le robot mobile est apte à se déplacer au sol ; et
- le robot mobile est associé à un drone convoyeur, configuré pour transporter le robot mobile et permettant son découplage lorsqu'il est au sol.

18. Système d'analyse LIBS selon l'une quelconque des revendications 12 à 16,

dans lequel le robot mobile est associé à un dispositif d'accueil, en particulier un robot principal, pour le transport, stockage et/ou rechargement du robot mobile, et pour le transfert de données vers la base.

5

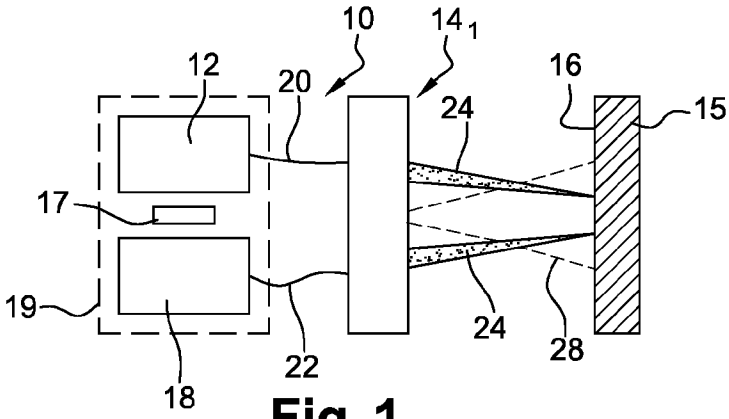


Fig. 1

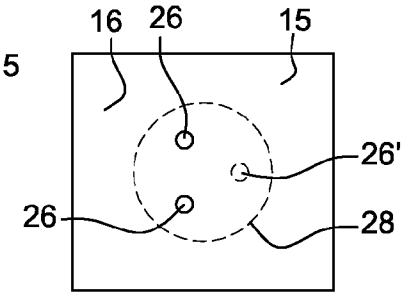


Fig. 2

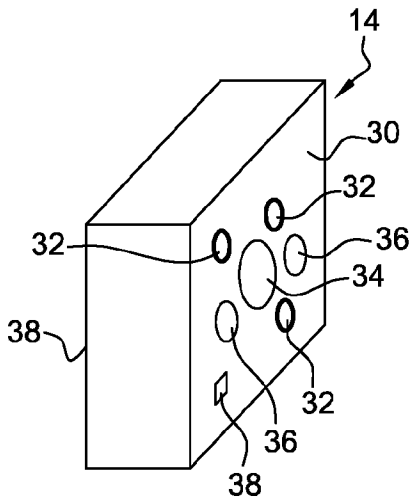


Fig. 3

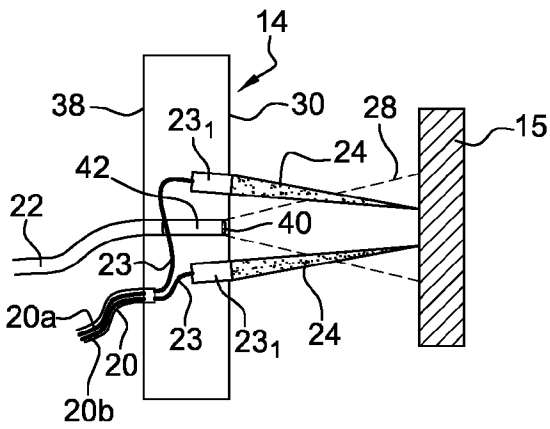


Fig. 4

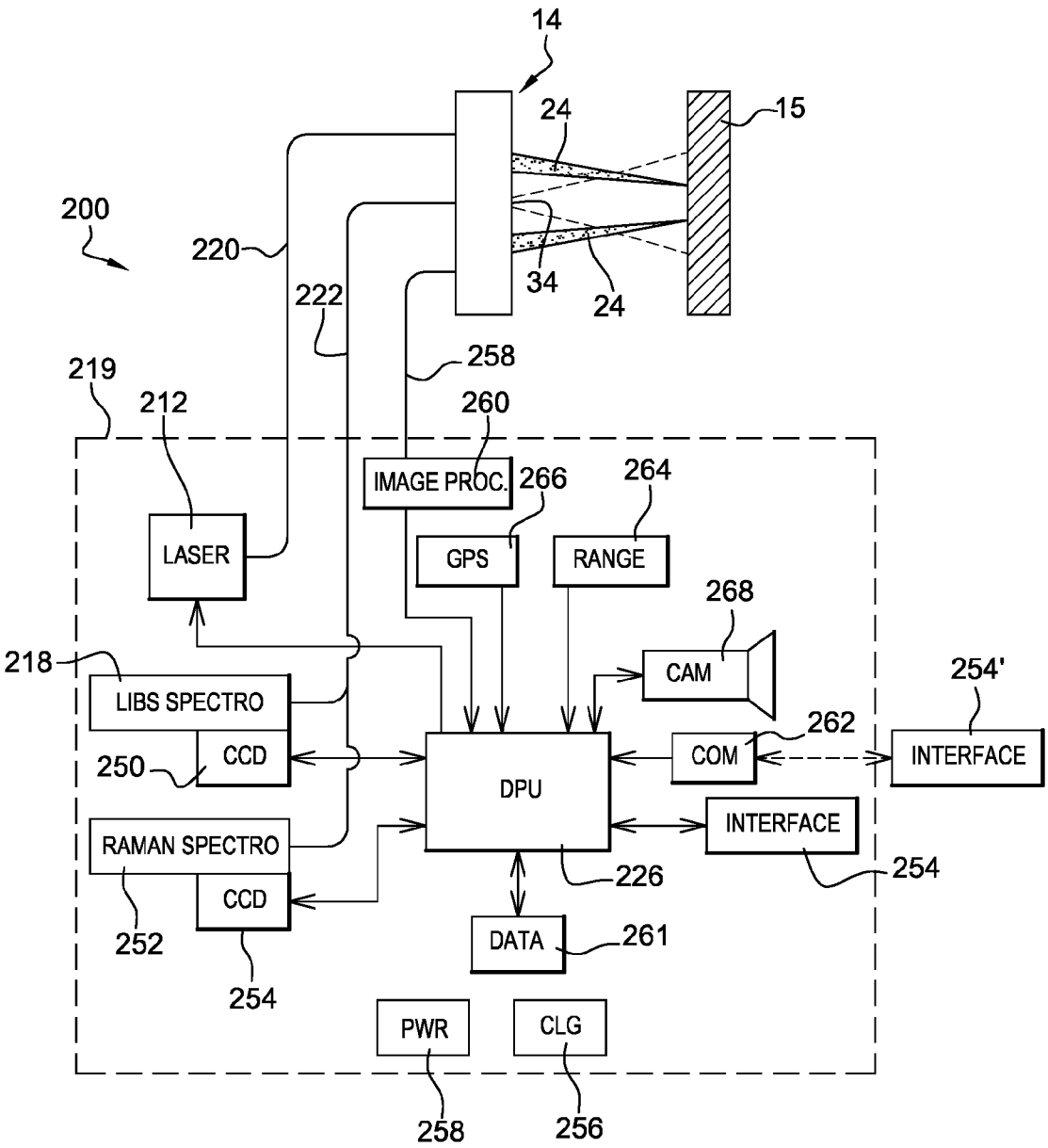

14
24
15
200
220
34
24
222
258
219
212
260
IMAGE PROC.
266
264
LASER
GPS
RANGE
268
218
CAM
254'
LIBS SPECTRO
262
CCD
250
COM
INTERFACE
DPU
INTERFACE
RAMAN SPECTRO
226
254
CCD
252
DATA
261
254
PWR
CLG
258
256

Fig. 5

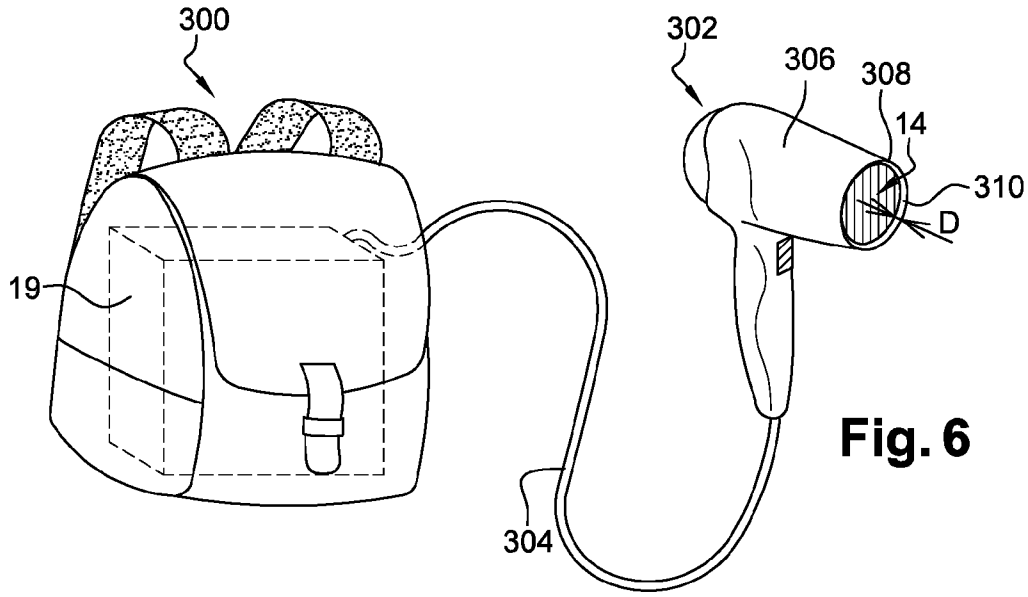


Fig. 6

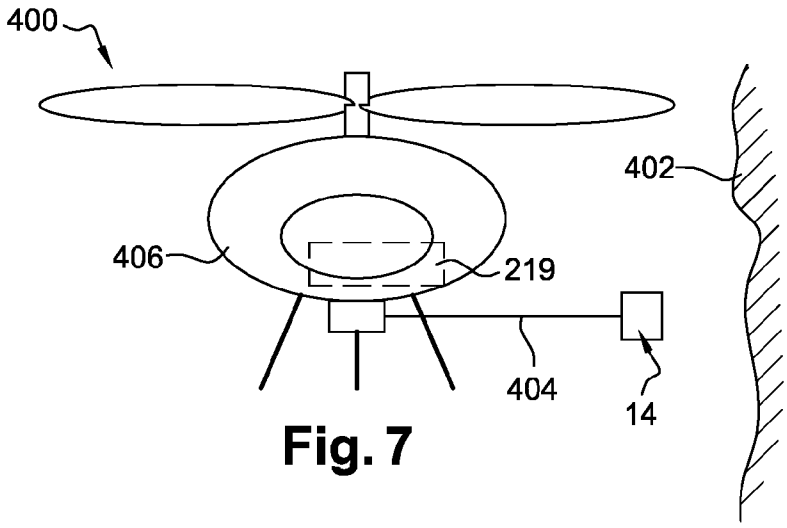


Fig. 7

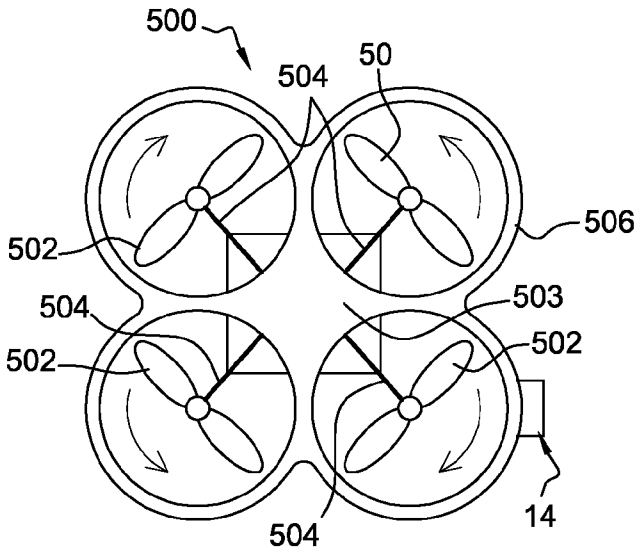
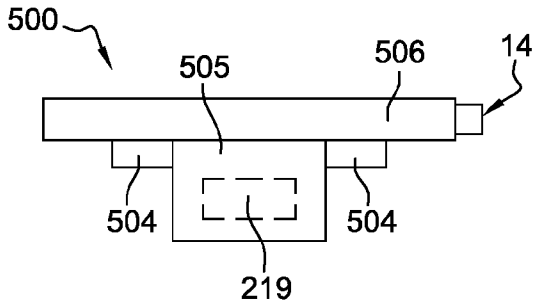


Fig. 8

Fig. 9


500
505
506
14
504
504
219

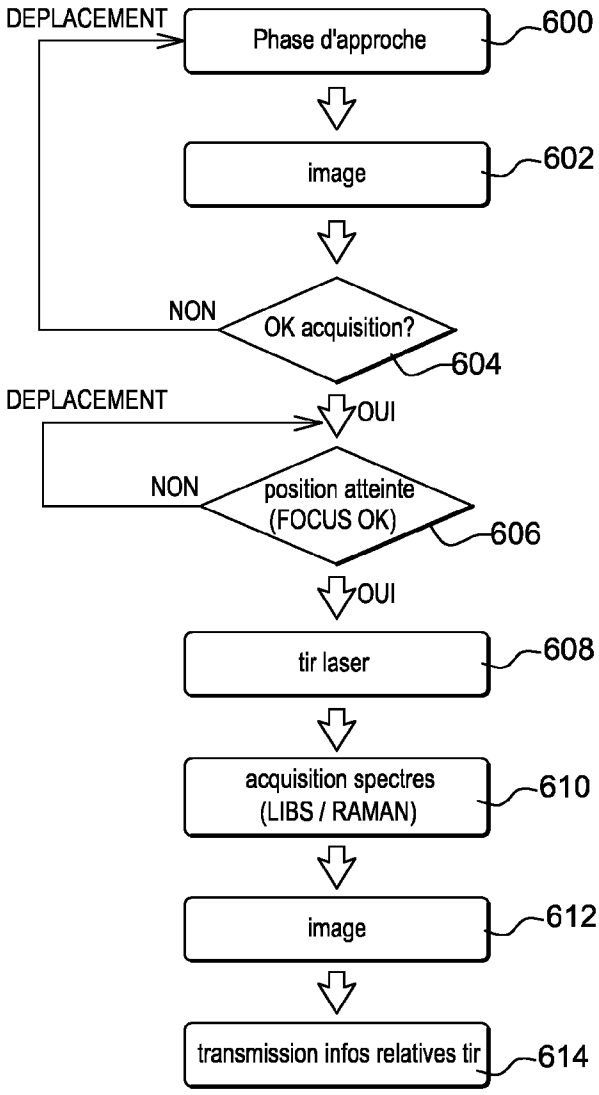

DEPLACEMENT
Phase d'approche
600
image
602
NON
OK acquisition?
604
DEPLACEMENT
OUI
NON
position atteinte
(FOCUS OK)
606
OUI
tir laser
608
acquisition spectres
(LIBS / RAMAN)
610
image
612
transmission infos relatives tir
614

Fig. 10

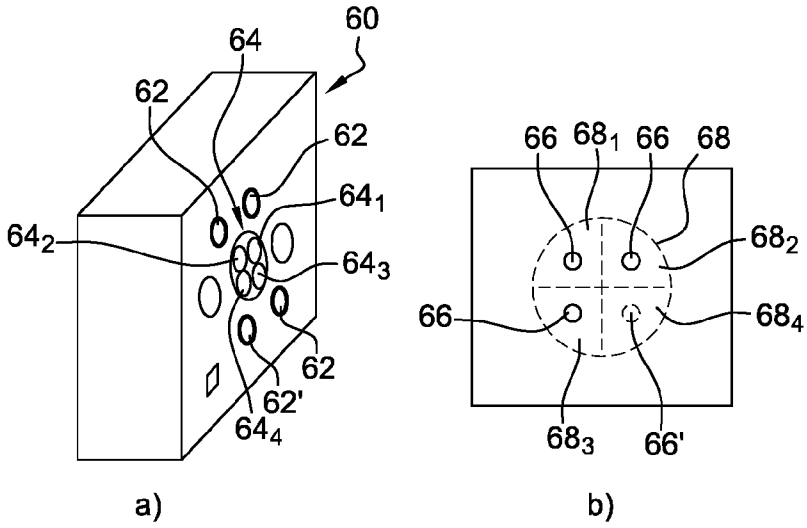


Fig. 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/062961

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01N21/65 G01J3/443 G01N33/24 G01N21/71 G01N1/04
F21V8/00
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)
G01N G01J B07C G02B

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, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	BOUSQUET B ET AL: "Development of a mobile system based on laser-induced breakdown spectroscopy and dedicated to in situ analysis of polluted soils", SPECTROCHIMICA ACTA. PART B: ATOMIC SPECTROSCOPY, NEW YORK, NY, US, US, vol. 63, no. 10, 2008, pages 1085-1090, XP025644489, ISSN: 0584-8547, DOI: 10.1016/J.SAB.2008.09.008 [retrieved on 2008-09-30] paragraph [03.1]; figure 3 -----	1,8-11
Y	DE 10 2005 000840 A1 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 20 July 2006 (2006-07-20) paragraph [0011] - paragraph [0018] claims 9-15 ----- -/--	1,8-11

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[X] 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
30 July 2015	11/08/2015

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Consalvo, Daniela

1

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/062961

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	BAZALGETTE COURREGES-LACOSTE ET AL: "Combined Raman spectrometer/laser-induced breakdown spectrometer for the next ESA mission to Mars", SPECTROCHIMICA ACTA. PART A: MOLECULAR AND BIOMOLECULAR SPECTROSCOPY, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 68, no. 4, 15 November 2007 (2007-11-15), pages 1023-1028, XP022346889, ISSN: 1386-1425, DOI: 10.1016/J.SAA.2007.03.026 page 1023, column 1, line 9 - page 1024, column 1, line 6; figure 1 paragraphs [004.], [04.2]; figure 5 -----	1-18
A	US 2008/165344 A1 (TREADO PATRICK J [US] ET AL) 10 July 2008 (2008-07-10) paragraphs [0023] - [0028], [0030], [0031] paragraphs [0038] - [0045], [0048]; figures 1,3,6 -----	1-18

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2015/062961

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 102005000840 A1	20-07-2006	NONE	
US 2008165344 A1	10-07-2008	EP 1902300 A2	26-03-2008
		US 2008165344 A1	10-07-2008
		WO 2007032814 A2	22-03-2007

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/EP2015/062961

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. G01N21/65 G01J3/443 G01N33/24 G01N21/71 G01N1/04
F21V8/00
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)
G01N G01J B07C G02B

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, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	BOUSQUET B ET AL: "Development of a mobile system based on laser-induced breakdown spectroscopy and dedicated to in situ analysis of polluted soils", SPECTROCHIMICA ACTA. PART B: ATOMIC SPECTROSCOPY, NEW YORK, NY, US, US, vol. 63, no. 10, 2008, pages 1085-1090, XP025644489, ISSN: 0584-8547, DOI: 10.1016/J.SAB.2008.09.008 [extrait le 2008-09-30] alinéa [03.1]; figure 3	1,8-11
Y	DE 10 2005 000840 A1 (FRAUNHOFER GES FORSCHUNG [DE]) 20 juillet 2006 (2006-07-20) alinéa [0011] - alinéa [0018] revendications 9-15	1,8-11

-/--

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

[X] 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	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
30 juillet 2015	11/08/2015

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

1

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	BAZALGETTE COURREGES-LACOSTE ET AL: "Combined Raman spectrometer/laser-induced breakdown spectrometer for the next ESA mission to Mars", SPECTROCHIMICA ACTA. PART A: MOLECULAR AND BIOMOLECULAR SPECTROSCOPY, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 68, no. 4, 15 novembre 2007 (2007-11-15), pages 1023-1028, XP022346889, ISSN: 1386-1425, DOI: 10.1016/J.SAA.2007.03.026 page 1023, colonne 1, ligne 9 - page 1024, colonne 1, ligne 6; figure 1 alinéas [004.], [04.2]; figure 5	1-18
A	US 2008/165344 A1 (TREADO PATRICK J [US] ET AL) 10 juillet 2008 (2008-07-10) alinéas [0023] - [0028], [0030], [0031] alinéas [0038] - [0045], [0048]; figures 1,3,6	1-18

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°
PCT/EP2015/062961

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
DE 102005000840 A1	20-07-2006	AUCUN	
US 2008165344 A1	10-07-2008	EP 1902300 A2	26-03-2008
		US 2008165344 A1	10-07-2008
		WO 2007032814 A2	22-03-2007