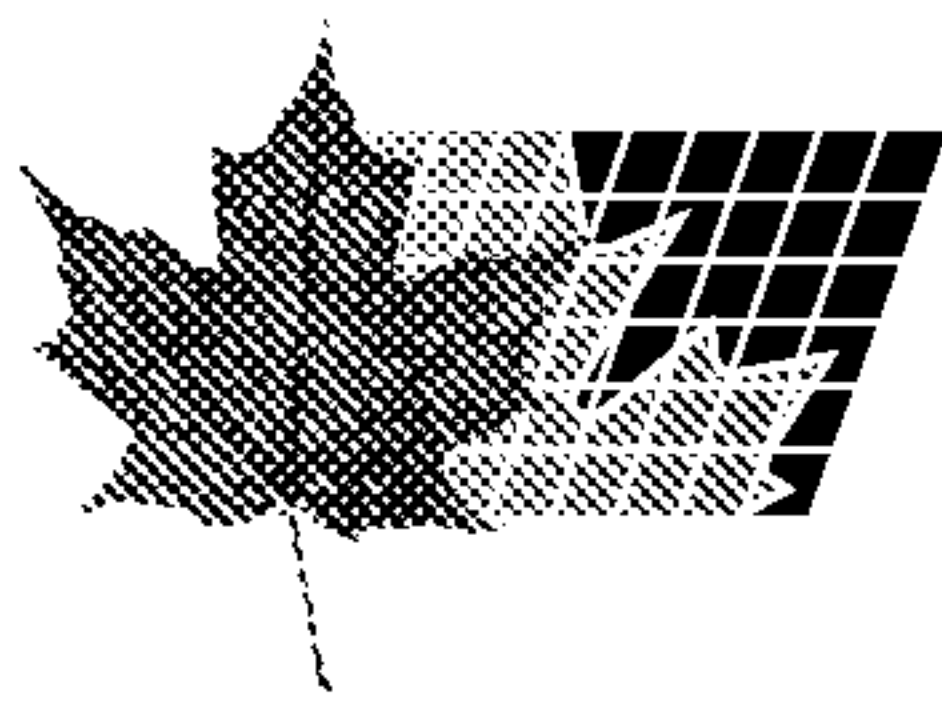
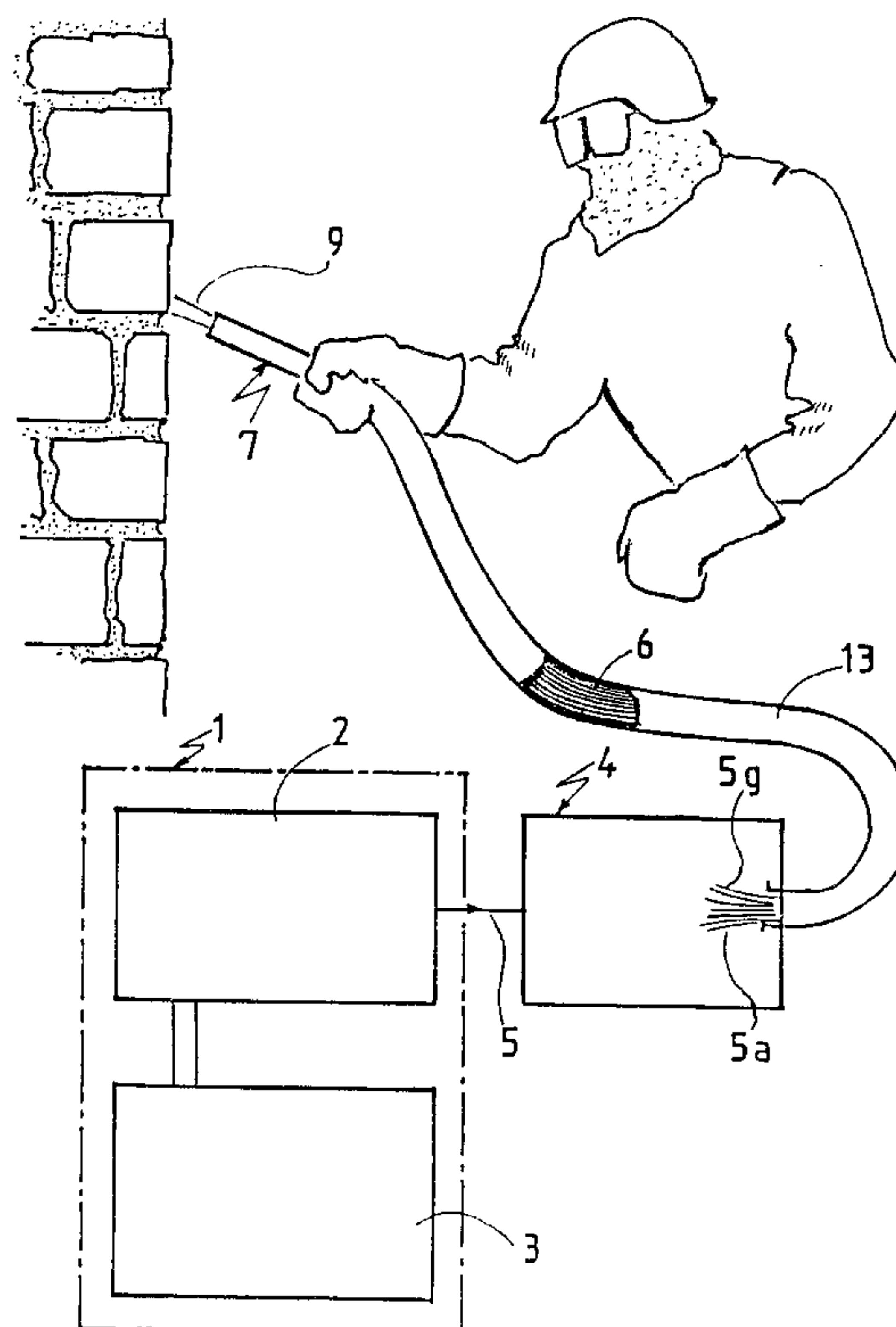




(11) (21) (C) **2,025,463**
(86) 1990/01/17
(87) 1990/07/18
(45) 2000/03/21

(72) Berger, Hubert, FR
(72) Boquillon, Jean-Pierre, FR
(72) Bresson, Philippe, FR
(73) Agence Régionale de Développement Technologiques, FR
(51) Int.Cl.⁵ B08B 7/00
(30) 1989/01/17 (89 00496) FR

(54) **PROCEDE DE NETTOYAGE DE LA SURFACE DE MATIERES
SOLIDES ET DISPOSITIF DE MISE EN OEUVRE DE CE
PROCEDE, UTILISANT UN LASER IMPULSIONNEL DE
PUISSANCE, A IMPULSIONS COURTES, DONT ON
FOCALISE LE FAISCEAU SUR LA SURFACE A NETTOYER**
(54) **SOLID SURFACE CLEANING APPARATUS AND METHOD
USING A SHORT IMPULSE LASER BEAM FOR USED ON THE
SURFACE TO BE CLEANED**



(57) L'invention se rapporte à un procédé de nettoyage de la surface de matériaux, telles que particulièrement de la pierre, du verre, de l'acier, de la céramique, du bois, du papier ou du carton, du type mettant en oeuvre un faisceau laser que l'on focalise sur la surface à nettoyer, caractérisé en ce qu'on règle la "puissance crête" du laser utilisé à cet effet à une valeur comprise entre quelques centaines de kilowatts et quelques dizaines de mégawatts, le diamètre du faisceau laser sur la surface à nettoyer étant choisi de façon à obtenir sur cette surface une dentité de "puissance crête" comprise entre quelques dixièmes de megawatts par cm^2 et quelques dizaines de mégawatts par cm^2 .



P R E C I S

L'invention se rapporte à un procédé de nettoyage de la surface de matériaux, telles que particulièrement de la pierre, du verre, de l'acier, de la céramique, du bois, du papier ou du carton, du type mettant en oeuvre un faisceau laser que l'on focalise sur la surface à nettoyer, caractérisé en ce qu'on règle la "puissance crête" du laser utilisé à cet effet à une valeur comprise entre quelques centaines de kilowatts et quelques dizaines de mégawatts, le diamètre du faisceau laser sur la surface à nettoyer étant choisi de façon à obtenir sur cette surface une densité de "puissance crête" comprise entre quelques dixièmes de megawatts par cm^2 et quelques dizaines de mégawatts par cm^2 .

Nettoyage d'une surface avec un laser

5

L'invention concerne un procédé de nettoyage de la surface de matériaux, telles que particulièrement de la pierre, du verre, de l'acier, de la céramique, du bois, du papier ou du carton, et un dispositif de mise en oeuvre de ce
10 procédé, utilisant un laser impulsionnel à impulsions courtes, dont on focalise le faisceau sur la surface à nettoyer.

On connaît à ce jour plusieurs procédés de nettoyage de la surface d'objets ou d'édifices ayant été pollués, soit en
15 raison de leur usage dans un environnement salissant ou agressif, soit au cours de leur fabrication dans un contexte industriel.

Pour ce qui concerne le premier cas, qui recouvre de manière non exhaustive le rajeunissement de l'état de surface
20 des monuments, des objets d'art du type des verres, des céramiques, ou encore de pièces métalliques du type de monnaies, de bronze, d'armes et autres antiquités, il est connu d'utiliser des moyens mécaniques - tels que notamment la projection de silice pulvérulente pour le nettoyage de
25 pierre, ou l'utilisation de fraises de précision pour la désincrustation de concrétions sur de petits objets - ou des moyens chimiques, tels que par exemple des acides. Or, ces techniques nécessitent une mise en oeuvre délicate et longue peu adaptée à un rendement économique convenable, sans pour
30 autant garantir un nettoyage parfait de toute la saleté déposée. Un procédé plus récent, développé en laboratoire, utilise un laser de puissance impulsionnel YAG, fonctionnant en mode relaxé, les impulsions obtenues variant ainsi de 0,1 milliseconde à environ 10 millisecondes.

35 Un tel procédé est une illustration du procédé décrit dans le brevet US-4 756 765 qui concerne l'enlèvement de la surface d'un substrat de matériaux polluants présentant une faible conduction thermique, tels des peintures, de la graisse ou des céramiques ; cet enlèvement résulte d'un effet

thermique, et nécessite, pour ce faire, que le faisceau laser dirigé sur la surface à décaper présente une forte énergie, et une durée d'impulsion typiquement supérieure à 3 microsecondes, de manière à ce que, après focalisation, la densité d'énergie (ou fluence) soit comprise entre 2 J/cm² et 100 J/cm². Ce dernier procédé, même s'il s'inscrit davantage dans un objectif industriel que dans le simple nettoyage d'objets ou d'édifices pollués, met en oeuvre les mêmes phénomènes physiques. On retrouve ainsi des conditions sensiblement identiques de fonctionnement d'un laser dans la demande internationale WO-83/01400, qui décrit un procédé plus particulièrement destiné au nettoyage de la coque de navires ; la fluence atteint une valeur proche de 20 J/cm², le laser utilisé pouvant typiquement être un laser CO₂ ou un laser YAG. A plus basse énergie, il a été proposé de supprimer la couche superficielle de rouille présente sur les surfaces métalliques, ce procédé faisant l'objet de la demande de brevet française FR-2 467 656 ; le laser utilisé est un laser CO₂, focalisé sur la surface à nettoyer de manière à ce que la fluence atteigne environ 5 J/cm². Par ce procédé, on transforme la rouille en magnétite ; mais cette couche étant très adhérente à la superficie du métal traité, elle doit ensuite être retirée par des moyens conventionnels, mécaniques ou chimiques. On retrouve le même inconvénient dans la demande de brevet française FR-2 300 632 ; le laser ne sert ici qu'à échauffer brusquement et intensément la pellicule superficielle d'oxydes présente à la surface d'objets métalliques, celle-ci étant finalement détachée du substrat métallique par une action mécanique, chimique, ou électrochimique.

Tous ces procédés présentent, par conséquent, des inconvénients liés à leur spécificité et ils ne constituent en aucun cas un moyen général et unique de nettoyage de matériaux, objets ou édifices, se situant dans un environnement polluant ou industriel. Par ailleurs, ces procédés restent des moyens agressifs dont il s'avère difficile de limiter l'action à la seule couche de saleté incrustée. Notamment, du fait que les spectres d'absorption

des matériaux polluants ou sous-jacents qui sont traités peuvent être très larges ou, au contraire, très étroits, il peut se produire, dans bien des cas, une inadéquation de la longueur d'onde du faisceau laser utilisé par rapport au nettoyage recherché ; ce faisceau peut ainsi être absorbé non seulement par la couche superficielle polluante à éliminer, mais également par le matériau sous-jacent, d'où un risque d'endommagement de celui-ci par échauffement. En effet, la puissance moyenne déposée par le faisceau laser sur le matériau à nettoyer atteint des valeurs élevées lorsque, d'une part les impulsions laser sont longues, et d'autre part l'énergie des impulsions et leur fréquence sont trop élevées, ce qui est le cas dans les procédés de l'art antérieur. On peut enfin citer, dans un domaine d'application très spécifique, la demande de brevet française FR-2 525 380 ; dans ce document, il est établi qu'on peut décontaminer des composants de centrales nucléaires présentant une couche d'oxydes radioactifs au moyen d'un laser impulsif d'intensité suffisante pour permettre une pénétration thermique correspondant à l'épaisseur de la couche d'oxydes, sans endommager le substrat métallique sous-jacent. Ce dernier procédé est sensiblement différent des procédés précédemment décrits, en ce sens que s'il préconise l'utilisation de densités d'énergie supérieures à 4 J/cm^2 , normalement proches de 10 J/cm^2 , les impulsions laser utilisées peuvent aussi être plus courtes. Ce procédé présente néanmoins l'inconvénient de mettre en oeuvre un effet thermique dont on a précédemment mentionné les risques vis à vis du matériau sous-jacent.

La présente invention vise à remédier à ces inconvénients, et propose une alternative à ces procédés de nettoyage utilisant l'effet de volatilisation des couches superficielles du matériau lorsque celui-ci est soumis à un rayonnement optique cohérent dont la densité, en puissance instantanée, est suffisante pour générer, à l'interface de la matière et du milieu extérieur, une onde de choc ayant pour effet de décoller au moins une partie de la couche superficielle polluante recouvrant ledit matériau.

Il convient donc ici de raisonner plus en terme de densité de puissance qu'en terme de densité d'énergie, ou fluence, du faisceau laser ; en effet, l'onde de choc visée par la présente invention est due à une interaction
5 instantanée d'un faisceau de forte puissance avec la surface à nettoyer, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une interaction brève avant d'être énergétique. C'est pourquoi, par exemple, une impulsion laser présentant un pic élevé suivi d'une décroissance plus lente convient tout à fait à la mise en
10 oeuvre de l'invention, même si, par ailleurs, l'énergie déposée, que l'on calcule de la manière habituelle par intégration au cours du temps de la puissance instantanée, retrouve des valeurs comparables à celles décrites dans les brevets antérieurs déjà mentionnés. En l'espèce, l'onde de
15 choc ne peut s'établir qu'en dehors de tout phénomène thermique d'absorption majoritaire, et il est clair qu'on doit alors éviter des impulsions laser longues et/ou trop énergétiques.

Le procédé selon l'invention concerne ainsi un procédé
20 de nettoyage de la surface de matériaux, telles que particulièrement de la pierre, du verre, de l'acier, de la céramique, du bois, du papier ou du carton, du type mettant en oeuvre un faisceau laser que l'on focalise sur la surface à nettoyer, caractérisé en qu'on règle la "puissance crête"
25 du laser utilisé à cet effet à une valeur comprise entre quelques centaines de kilowatts et quelques dizaines de mégawatts, le diamètre du faisceau laser sur la surface à nettoyer étant choisi de façon à obtenir sur cette surface une densité de "puissance crête" comprise entre quelques
30 dixièmes de mégawatts par cm^2 et quelques dizaines de mégawatts par cm^2 .

Suivant une caractéristique complémentaire de l'invention, le laser fournit des impulsions dont la durée peut varier entre quelques nanosecondes et quelques
35 microsecondes.

Suivant une autre caractéristique, la longueur d'onde de la radiation émise par ce laser se situe à l'intérieur du

spectre d'absorption du matériau polluant, formant une couche superficielle sur la surface du matériau à nettoyer.

Par ailleurs, comme le spectre d'absorption du matériau polluant est généralement différent du spectre d'absorption du matériau à nettoyer sous-jacent, au fur et à mesure que le nettoyage de la surface du matériau s'effectue, il apparait des couches superficielles moins polluées et donc généralement plus réfléchissantes vis à vis du rayonnement laser : les risques d'altération du matériau sous-jacent sont ainsi pratiquement inexistants. Cet effet se comprend particulièrement bien dans le cas où le matériau à nettoyer est de la pierre, du type du granit par exemple.

Le cas du décapage ou du décalaminage de matériaux notamment métalliques, et plus généralement de matériaux dont le spectre d'absorption recouvre en partie celui du matériau polluant, est identique, mais peut nécessiter, conformément à une caractéristique complémentaire de l'invention, l'utilisation d'un laser à fréquence d'émission variable ou accordable, dont la longueur d'onde d'émission peut être réglée continument ou discrètement au fur et à mesure du nettoyage, la plage de longueur d'onde nécessaire à cet effet étant fonction des deux spectres d'absorption. L'utilisation d'un tel laser rend également plus efficace le procédé conforme à l'invention lorsque le spectre d'absorption du matériau polluant est très étroit, le laser accordable permettant alors de volatiliser ce matériau dans les meilleures conditions. A l'inverse, on peut profiter d'une "fenêtre" de transparence du matériau sous-jacent à nettoyer vis à vis de certaines longueurs d'onde pouvant être émises par le laser accordable utilisé, ces longueurs d'onde étant par ailleurs absorbées par le matériau polluant ; dans ces conditions, le risque d'endommagement du matériau sous-jacent est nettement diminué.

L'utilisation d'impulsions laser de forte puissance instantanée constitue donc l'apport principal du procédé selon l'invention ; l'énergie de chaque impulsion étant ainsi fixée, on sait alors parfaitement que plus on diminue la durée desdites impulsions, plus on augmente leur "puissance

crête". En focalisant cette puissance disponible sur la surface à nettoyer selon un diamètre de faisceau suffisamment faible, la densité de puissance disponible est de plus en plus importante.

5 La faible durée des impulsions permet de déposer sur le matériau à nettoyer une puissance moyenne seulement égale à quelques watts ou quelques dizaines de watts ; cette puissance est réglable si on dispose, par ailleurs, d'un moyen de contrôle de la fréquence de répétition des
10 impulsions émises par le laser.

Cette faible puissance moyenne requise par le procédé conforme à la présente invention permet, en outre, de disposer d'un laser de faible encombrement et consommant peu d'énergie, même lorsque le rendement de fonctionnement de ce
15 laser est faible. Ainsi pourra-t-on utiliser, de manière bien entendu non exhaustive, des lasers à milieu amplificateur solide, et notamment des lasers du type YAG dopé au néodyme, du type à saphir dopé au titane, et du type à alexandrite, des lasers à colorant, ou encore des lasers à excimères.

20 D'autres caractéristiques et avantages du procédé selon l'invention ressortiront mieux de la description qui va suivre d'un mode de mise en oeuvre non limitatif de ce procédé en référence au dessins annexés sur lesquels :

-la figure 1 est une vue générale d'un dispositif de
25 mise en oeuvre du procédé selon l'invention, applicable par exemple au nettoyage des monuments historiques.

-la figure 2 est une vue en élévation de la pièce à main telle que décrite par la suite.

-la figure 3 est un schéma optique de principe du
30 système optique de séparation du faisceau laser tel que décrit par la suite.

Conformément à une première forme de réalisation du procédé selon l'invention, il est utilisé un laser à milieu amplificateur solide du type cristal ou verre de grenat
35 d'yttrium et d'aluminium YAG dopé au néodyme, fonctionnant en mode déclenché, et fournissant par conséquent des impulsions dont la durée peut varier entre un dizaine de nanosecondes et une trentaine de nanosecondes ; afin de se trouver dans les

conditions de fonctionnement spécifiques au procédé de l'invention, l'énergie par impulsion est égale au maximum à environ 500 millijoules, et le diamètre moyen du faisceau issu dudit laser présente un diamètre inférieur à une dizaine de millimètres sur la surface à nettoyer.

Un tel laser a un encombrement réduit, de l'ordre du m^3 , ce qui est un avantage pour son transport, et son alimentation en énergie est constituée classiquement d'une armoire d'encombrement équivalent. La consommation s'établit à environ 4 kilowatts par heure dans les conditions précitées, et en choisissant une fréquence de répétition des impulsions égales à une trentaine de hertz. Ceci permet de relier le dispositif à un groupe électrogène transportable, notamment utilisable sur un chantier lors du nettoyage d'objets ou d'édifices se situant en milieu pollué, tels des statues, des monuments historiques, ou autres antiquités. Le nettoyage d'autres édifices plus courants est tout à fait envisageable, mais son intérêt économique reste à démontrer.

Le choix de la fréquence de fonctionnement du laser n'est pas très important mais il semble, d'après les études réalisées en laboratoire et sur le chantier, qu'une fréquence égale à quelques dizaines de hertz permette d'obtenir les meilleurs résultats : en effet, il semble que cette plage de fréquence convienne d'une façon satisfaisante à une mise en oeuvre particulière du procédé selon l'invention dont la description suivante fournit un exemple non limitatif pour ce qui concerne le nettoyage d'un édifice en milieu extérieur.

Ainsi, conformément à la figure 1, on choisit de confier à un opérateur le déplacement du lieu de focalisation du faisceau laser sur la surface à nettoyer, préférentiellement à un déplacement automatisé, du type balayage optique, qui aurait le désavantage de provoquer une série de défauts répétitifs, conséquences d'une hétérogénéité spatiale en énergie de la section du faisceau laser, même après sa focalisation sur la surface à nettoyer. On notera cependant qu'un déplacement automatisé est utile dans d'autres applications du procédé de l'invention, notamment dans un contexte industriel.

Le dispositif de mise en oeuvre du procédé selon l'invention, conformément aux figures 1, 2 et 3, est ainsi bien adapté à une utilisation manuelle, fiable et efficace, en ce qu'il comprend, d'une part, un ensemble mécanique 1 contenant le laser 2 et son alimentation électrique 3, d'autre part, un boîtier 4, placé sur le trajet du faisceau laser 5 issu dudit ensemble mécanique 1, et contenant un système optique destiné à séparer le faisceau laser 5 en plusieurs autres faisceaux laser 5a,5b,5c,5d,5e,5f et 5g d'énergies approximativement égales entre elles, lesdits faisceaux laser 5a,5b,5c,5d,5e,5f et 5g étant alors guidés, par un ensemble 6 de fibres optiques, vers une pièce à main 7 comprenant un moyen optique 8 de recombinaison des faisceaux laser 5a,5b,5c,5d,5e,5f et 5g en un faisceau laser unique 9, et un moyen optique 10 de réglage du diamètre 11 dudit faisceau laser 9 recombiné, ce deuxième moyen 10 étant par exemple constitué par un montage optique afocal 12, ladite pièce à main 7 ayant une taille adéquate pour être facilement manipulée par l'opérateur procédant au nettoyage de la surface à nettoyer.

L'efficacité de ce nettoyage est ainsi très élevée: dans des conditions courantes de nettoyage de monuments historiques en pierre, on a estimé pouvoir restaurer complètement une surface égale à un mètre carré en une heure, ce rendement étant à comparer au rendement actuel des procédés mécaniques de projection de silice pulvérulente égal, au maximum, à un mètre carré par jour.

Une caractéristique importante du dispositif mettant en oeuvre le procédé selon l'invention concerne le choix des fibres optiques 6 qui transmettent les faisceaux laser 5a,5b,5c,5d,5e,5f et 5g à la pièce à main 7. Ce choix est intimement lié au choix de la durée des impulsions laser transmises par ces fibres optiques 6 ; en effet, il existe un seuil maximum de transmission en "puissance crête" d'un faisceau laser pour chaque type de fibre. Ceci explique le rôle du système optique 6 de séparation du faisceau laser 5 en plusieurs autres faisceaux 5a,5b,5c,5d,5e,5f et 5g.

Préférentiellement, les fibres optiques utilisées pour guider les faisceaux laser 5a, 5b, 5c, 5d, 5e, 5f et 5g vers la pièce à main 7 possèdent un coeur en silice et une gaine en silice ou en silicone dure. Ce choix semble être le seul possible dans les conditions actuelles de disponibilité des fibres optiques, du moins pour ce qui concerne le transport de faisceaux présentant une forte puissance crête.

On notera également qu'on choisit une longueur d'environ 30 mètres de fibres optiques, ce qui permet à l'opérateur de travailler à une distance suffisante des éléments fixes du dispositif mettant en oeuvre le procédé selon l'invention.

Il est enfin prévu une protection mécanique des fibres optiques au moyen d'une gaine externe 13 renforcée, ce qui permet d'utiliser le dispositif sur un chantier.

Par ailleurs, il est nécessaire de protéger le dispositif dans son intégralité contre la poussière résultant du nettoyage effectué par le laser : ainsi, à proximité de la surface à nettoyer, soit à environ une vingtaine de centimètres, la face optique 71 de sortie de la pièce à main 7 subit les agressions de la poussière provenant qui résulte de la pulvérisation de la couche superficielle de saleté se trouvant sur la pierre. On prévoit un dépoussiérage continu ou discontinu de cette face optique 71 en disposant, à l'intérieur ou à l'extérieur de la pièce à main 7, un dispositif procurant un jet 14 d'un fluide, tel qu'avantageusement de l'air. Un compresseur alimente ce dispositif, la liaison entre le compresseur et le dispositif procurant le jet 14 pouvant avantageusement être un tube protégé par la gaine 13 de renforcement des fibres 6.

En outre, le boîtier 4 contenant le système optique de séparation du faisceau laser 5 en plusieurs faisceaux 5a, 5b, 5c, 5d, 5e, 5f, 5g est préférentiellement un boîtier étanche dans lequel on réalise le vide : cette configuration permet de protéger efficacement les éléments optiques du système de séparation du faisceau contre la poussière. De plus, il permet d'éviter les claquages résultant de la focalisation du faisceau laser 5 sur des

poussières, se trouvant à l'intérieur du boîtier 4, sur la trajet dudit faisceau laser 5.

On notera enfin le rôle du moyen optique de réglage 10, du diamètre 11 du faisceau laser 9 recombinaison, qui se trouve dans le corps de la pièce à main 7. Ce moyen optique 10, constitué par exemple par un montage optique afocal 12, comprenant une lentille divergente et une lentille convergente, permet, à partir d'une même énergie du faisceau laser 9 disponible, d'obtenir une densité de "puissance crête" variable : l'opérateur a ainsi la possibilité de varier l'efficacité du nettoyage en fonction du niveau d'incrustation de saleté qu'il constate sur la surface à nettoyer : en augmentant le diamètre 11 par le biais du moyen optique 10, il fait directement varier cette efficacité du nettoyage.

Conformément à une deuxième forme de réalisation du procédé selon l'invention, il est utilisé un laser à colorant ou un laser à milieu amplificateur solide du type saphir dopé au titane ou du type alexandrite. De tels lasers sont des lasers à fréquence variable ou accordable. Typiquement, un laser à colorant émet ainsi dans le spectre visible, entre 500 et 720 nanomètres suivant le colorant utilisé. Les lasers à saphir dopé au titane émettent, quant à eux, sur une plage de longueur d'onde allant de 700 à 1100 nanomètres ; associé à un doubleur de fréquence, d'un type par exemple bien connu utilisant le phénomène de biréfringence optique induite dans un matériau par un champ électrique, il est alors possible de disposer d'une plage de longueur d'onde variable de 350 à 550 nanomètres. De cette façon, il est donc possible, après étude préalable des spectres d'absorption respectifs du matériau à nettoyer, et du matériau polluant formant une couche à sa surface, de choisir et de régler la longueur d'onde d'émission du laser accordable utilisé de manière à se trouver dans des conditions optimales de nettoyage, c'est-à-dire associant la meilleure efficacité d'absorption du matériau polluant vis à vis du faisceau laser, sans se départir, néanmoins, d'une durée d'impulsion suffisamment

courte, apte à générer le phénomène d'onde de choc caractérisant le procédé de l'invention.

Ainsi, on peut utiliser un laser à colorant en mode relaxé, celui-ci émettant alors des impulsions de quelques
5 microsecondes, ou en mode déclenché, les impulsions durant alors quelques nanosecondes. Par contre, dans le cas des lasers à milieu amplificateur solide d'un type déjà mentionné, les durées d'impulsions varient de 1 à 3
microsecondes en mode relaxé, et sont de quelques dizaines de
10 nanosecondes en mode déclenché (durée comparable d'ailleurs à la durée d'une impulsion émise par un laser non accordable à milieu amplificateur solide du type YAG fonctionnant suivant le même mode).

L'utilisation d'un laser à fréquence variable ou
15 accordable est particulièrement intéressante dans le cas où les spectres d'absorption du matériau sous-jacent à nettoyer et du matériau polluant recouvrant sa surface se recoupent ; il existe en effet, dans cette situation, un risque d'altération du matériau sous-jacent, ce qui pose des
20 problèmes difficiles à résoudre, sauf à prévoir, conformément aux enseignements de la demande de brevet française FR-2 525 386 déjà mentionnée, des conditions de fonctionnement du laser susceptibles de fournir des impulsions produisant un effet thermique limité par leur profondeur de pénétration,
25 lors de leur interaction avec la surface à décaper ou à décalaminer. En utilisant un laser accordable, il est toujours possible de trouver une plage de longueurs d'onde de travail échappant au spectre d'absorption du matériau sous-jacent, une longueur d'onde de cette plage servant, soit dès
30 le début du traitement si elle est correctement absorbée par le matériau polluant, soit progressivement, ou complètement, au fur et à mesure que la couche polluée superficielle est volatilisée ; dans cette dernière configuration, un dispositif de contrôle adéquat, avec ou sans contre-réaction,
35 permet cette évolution du faisceau laser en longueur d'onde.

Une mise en oeuvre particulière de cette utilisation d'un laser accordable pour réaliser le procédé conforme à la présente invention consiste à nettoyer des produits

tubulaires dans un environnement industriel, soit lors de leur fabrication, soit dans le but de les décalaminer après usage. L'utilisation, dans ces cas spécifiques, d'un laser accordable n'est pas limitative, et on montré qu'un laser YAG
5 fonctionnant en mode déclenché dans les conditions déjà mentionnées plus haut convenait également. En outre, l'utilisation des lasers à excimères qui émettent un rayonnement ultraviolet s'est avérée intéressante, notamment du fait de la structure généralement vitreuse du matériau
10 polluant à éliminer de la surface des produits tubulaires, conformément à la description qui suivre.

Il s'agit ici de décaper, de dégraisser, ou plus généralement d'enlever les produits lubrifiants, tels du verre fusible ou de la graisse, se trouvant à l'intérieur
15 et/ou à l'extérieur de produits tubulaires issus par exemple d'une filière, ou ayant été percés par un mandrin, puis expansés ou réduits par des moyens conventionnels connus. A leur sortie du dispositif de mise en forme, c'est-à-dire du dispositif de forgeage, les tubes ou produits tubulaires,
20 sont ainsi très sales car leur réalisation met en oeuvre des lubrifiants, issus notamment de gargouzes placées en amont du dispositif de forgeage. Jusqu'à présent, il était connu de débarrasser les produits tubulaires de leur enduit lubrifiant par des moyens chimiques et/ou mécaniques du type d'un
25 grenailage interne et/ou externe ; une telle opération est nécessaire pour certains traitements ultérieurs spécifiques.

Conformément à la présente invention, on élimine la couche lubrifiante et la couche d'oxydes résiduelles présentes après le forgeage d'un produit tubulaire, issu par
30 exemple d'une filière, au moyen d'un faisceau laser balayant au moins l'une de ses surfaces interne ou externe, le laser utilisé à cet effet ayant toutes les caractéristiques nécessaires à l'obtention, sur la surface de la matière solide sous-jacente, par exemple, quoique non exclusivement
35 en acier, d'une onde de choc décollant lesdites couches, ledit laser étant par ailleurs du type accordable, ou non, quant à sa fréquence d'émission.

De la même façon, après installation en atmosphère industrielle d'un tube pollué par des dépôts, ou soumis à des conditions d'utilisation agressives, notamment dans des centrales thermiques, il est possible de décalaminer ce tube par le même procédé. La mise en oeuvre de l'invention nécessite en ce cas le transport du faisceau laser jusqu'à proximité de la zone d'interaction choisie, et on conçoit alors bien tout l'avantage procuré par le transport de ce faisceau au moyen d'au moins une fibre optique, suivant en cela les enseignements de la présente invention tels que décrits plus haut dans le texte. A ce titre, il convient de noter que l'utilisation d'un laser accordable peut considérablement simplifier la mise en oeuvre du procédé de nettoyage ; étant donné, en effet, qu'il est alors possible de réaliser une meilleure adéquation entre la longueur d'onde du laser utilisé et les spectres d'absorption respectifs du matériau sous-jacent à nettoyer, et du matériau polluant recouvrant sa surface, on peut faire fonctionner le laser à moindre énergie, ce qui facilite son transport par fibres optiques, voire permet de n'en utiliser qu'une seule, ou encore d'utiliser un type de fibre autre qu'une fibre en silice, ou en silicone dure.

Il est bien entendu que toute réalisation, autre que celles décrites plus avant, du procédé de nettoyage ou du dispositif de mise en oeuvre du procédé de nettoyage selon l'invention, si elle est réalisée dans l'esprit de celle-ci, ne sortirait en aucun cas de son cadre.

Le domaine de l'invention est notamment celui de la restauration d'oeuvres d'art, qu'il s'agisse de monuments historiques, de mobiliers en bois, ou encore de verres ou de poteries, et également celui du nettoyage de tubes lors de leur fabrication, ou de leur décalaminage ultérieur.

REVENDICATIONS

1. Procédé de nettoyage de la surface d'un objet recouvert d'une couche superficielle de matériaux polluants, l'objet étant constitué de matières appartenant à l'ensemble comprenant la pierre, le verre, l'acier, la céramique, le bois, le papier et le carton, ce procédé comprenant les étapes suivantes :
- 5 l'utilisation d'un laser pour produire un faisceau laser pulsé qui est focalisé sur la surface à nettoyer,
caractérisé en ce qu'il comprend en outre :
- 10 le réglage de la durée des impulsions du faisceau laser à une valeur inférieure à 30 ns,
le réglage de la puissance instantanée et du diamètre du faisceau laser au niveau de la surface à nettoyer, de manière à obtenir sur cette surface une densité de puissance instantanée à une valeur comprise entre 0.1 MW/cm² et 100 MW/cm²,
- 15 l'application du faisceau laser pulsé sur une zone de la surface à nettoyer, ce qui nettoie cette zone sans y produire un effet thermique observable, et
retirer le faisceau laser de cette zone de la surface lorsque celle-ci est propre.
- 20 2. Procédé de nettoyage selon la revendication 1,
caractérisé en ce que le laser utilisé fournit des impulsions dont la durée peut varier entre 1 ns et 1 µs.
- 25 3. Procédé de nettoyage selon la revendication 1 ou 2,
caractérisé en ce que la longueur d'onde du faisceau laser émis par le laser se situe à l'intérieur du spectre d'absorption des matériaux polluants recouvrant la surface à nettoyer.
- 30 4. Procédé de nettoyage selon l'une quelconque des revendications 1 à 3,
caractérisé en ce que le laser utilisé présente une fréquence d'émission variable ou accordable, dont la longueur d'onde d'émission peut être réglée continûment ou discrètement au fur et à mesure du nettoyage, la plage de longueurs d'ondes requise à cet effet étant fonction des spectres d'absorption respectifs de la matière constituant l'objet à nettoyer et des matériaux polluant recouvrant sa surface.
- 35 5. Procédé de nettoyage selon la revendication 4,
caractérisé en ce que le laser utilisé est un laser à colorant.

6. Procédé de nettoyage selon la revendication 4,
caractérisé en ce que le laser utilisé est à milieu amplificateur solide à fréquence variable
ou accordable, du type à saphir dopé au titane, ou du type à alexandrite.
- 5 7. Procédé de nettoyage selon l'une quelconque des revendications 1 à 3,
caractérisé en ce que le laser utilisé est à milieu amplificateur solide du type cristal ou
verre de grenat d'yttrium ou d'aluminium YAG dopé au néodyme, fonctionnant en mode
déclenché, et fournissant des impulsions dont la durée peut varier entre 10 ns et 30 ns,
l'énergie maximale par impulsions étant proche de 500 mJ, et le diamètre du faisceau
10 produit par le laser étant inférieur à 10 mm sur la surface à nettoyer.
8. Procédé de nettoyage selon l'une quelconque des revendications 1 à 3,
caractérisé en ce que le laser utilisé est à excimères.
- 15 9. Procédé de nettoyage des surfaces interne et/ou externe d'un objet
tubulaire,
caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :
l'utilisation d'un laser pour produire un faisceau laser qui est focalisé sur la
surface à nettoyer, ce laser ayant une fréquence d'émission accordable, et délivrant des
20 impulsions dont la durée est comprise entre 1 ns et 30 ns,
le réglage de la puissance instantanée et du diamètre du faisceau laser au
niveau de la surface à nettoyer, de manière à obtenir sur cette surface une densité de
puissance instantanée à une valeur comprise entre 0.1 MW/cm² et 100 MW/cm²,
nécessaire à l'obtention, sur la surface sous-jacente de l'objet, d'une onde de choc apte à
25 décoller une couche lubrifiante et/ou une couche d'oxydes, présentes sur les dites
surfaces, résultant par exemple du forgeage du produit tubulaire, issu notamment d'une
filrière, ou encore de l'usage du dit objet tubulaire dans une atmosphère polluante, et
le balayage par le faisceau laser d'au moins l'une des dites surfaces interne
ou externe, pour obtenir l'élimination des dites couches.
- 30 10. Dispositif de nettoyage de la surface d'un objet recouvert d'une couche
superficielle de matériaux polluants, l'objet étant constitué de matières appartenant à
l'ensemble comprenant la pierre, le verre, l'acier, la céramique, le bois, le papier et le
carton,
35 caractérisé en ce qu'il comprend :
un ensemble mécanique (1) contenant un laser (2) et son alimentation
électrique (3), le laser étant apte à fournir des impulsions ayant une durée réglable entre

1 ns et 30 ns et une densité de puissance instantanée au niveau de la surface à nettoyer réglable entre 0.1 MW/cm² et 100 MW/cm², de manière à y produire des ondes de choc,
 un boîtier (4) placé sur le trajet du faisceau laser (5) issu de l'ensemble mécanique (1), et contenant un système optique destiné à séparer le faisceau laser (5) en
 5 plusieurs autres faisceaux laser (5a à 5g) d'énergies approximativement égales entre elles, guidés par un ensemble (6) de fibres optiques vers une pièce à main (7) comprenant un moyen optique (8) de recombinaison des faisceaux laser (5a à 5g) en un faisceau laser unique (9) et un moyen optique de réglage du diamètre (11) du faisceau laser recombinaison (9), ce moyen optique de réglage (10) étant constitué par un montage optique afocal
 10 (12), la pièce à main (7) ayant une taille adéquate pour être facilement manipulée par un opérateur procédant au nettoyage de la surface à nettoyer.

11. Dispositif de nettoyage selon la revendication 10, caractérisé en ce que les fibres optiques (6) utilisées pour guider les faisceaux laser (5a à
 15 5g) vers la pièce à main (7) possèdent un coeur en silice et une gaine en silice ou en silicone dure.

12. Dispositif de nettoyage selon l'une quelconque des revendications 10 et 11,
 20 caractérisé en ce qu'un dispositif produisant un jet (14) d'un fluide, est disposé à l'intérieur ou à l'extérieur de la pièce à main (7), procurant de manière continue ou discontinue un dépoussiérage d'une face optique (71) de sortie de la pièce à main (7).

13. Dispositif de nettoyage selon l'une quelconque des revendications 10 à 12,
 25 caractérisé en ce que le boîtier (4) est un boîtier étanche dans lequel le vide est réalisé, pour protéger efficacement les optiques de la poussière et éviter les claquages résultant de la focalisation du faisceau laser (5) dans le boîtier (4).

1/2

2025463

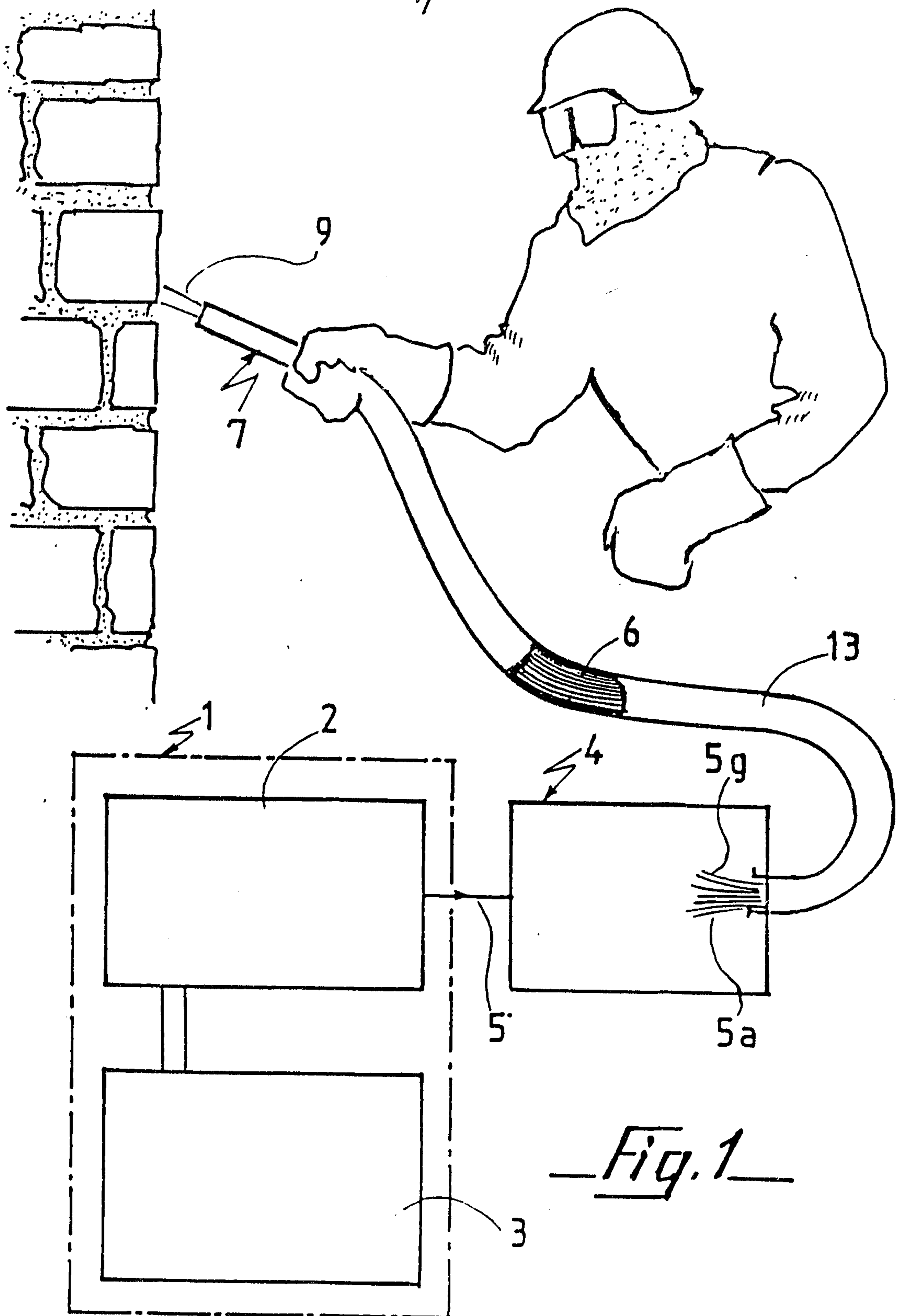
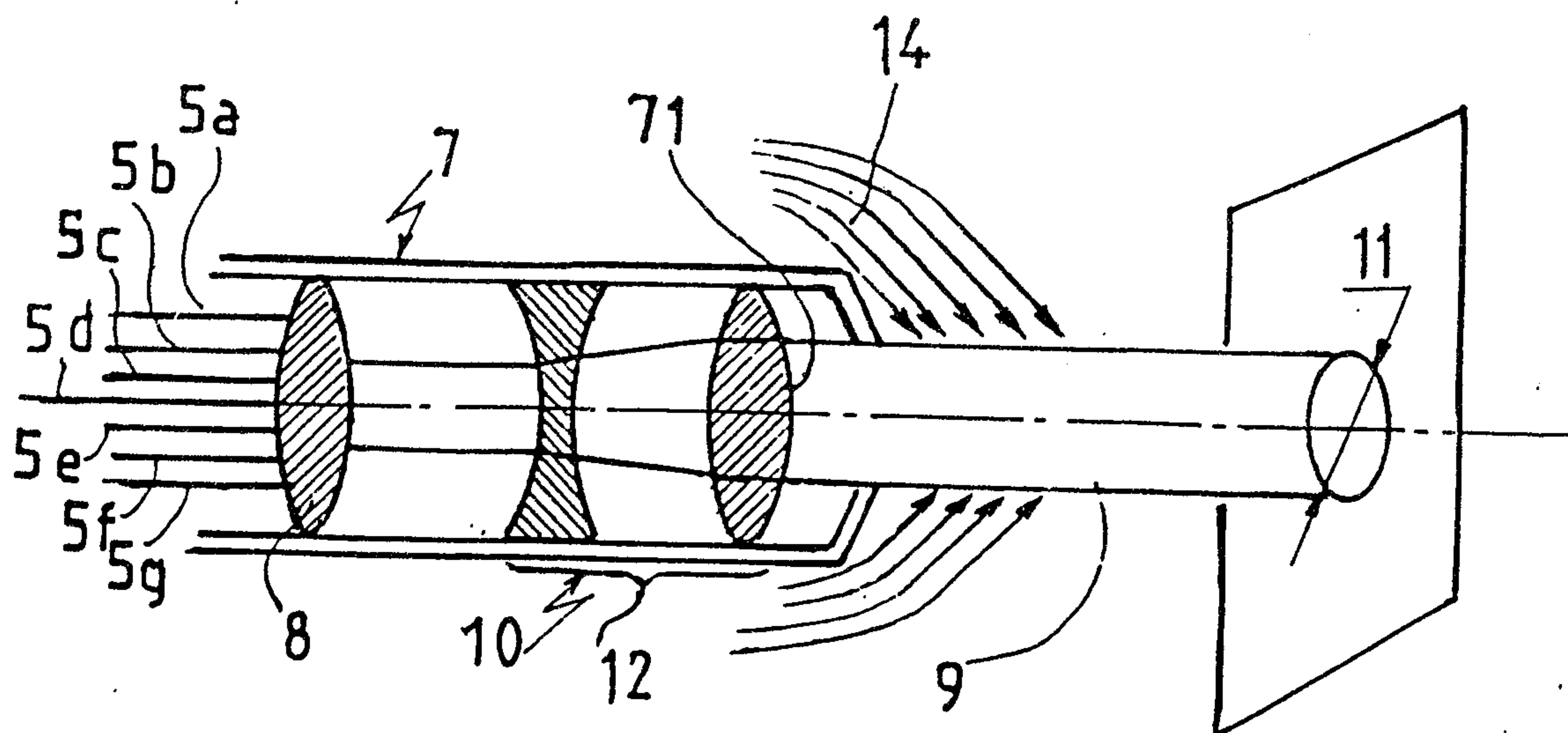


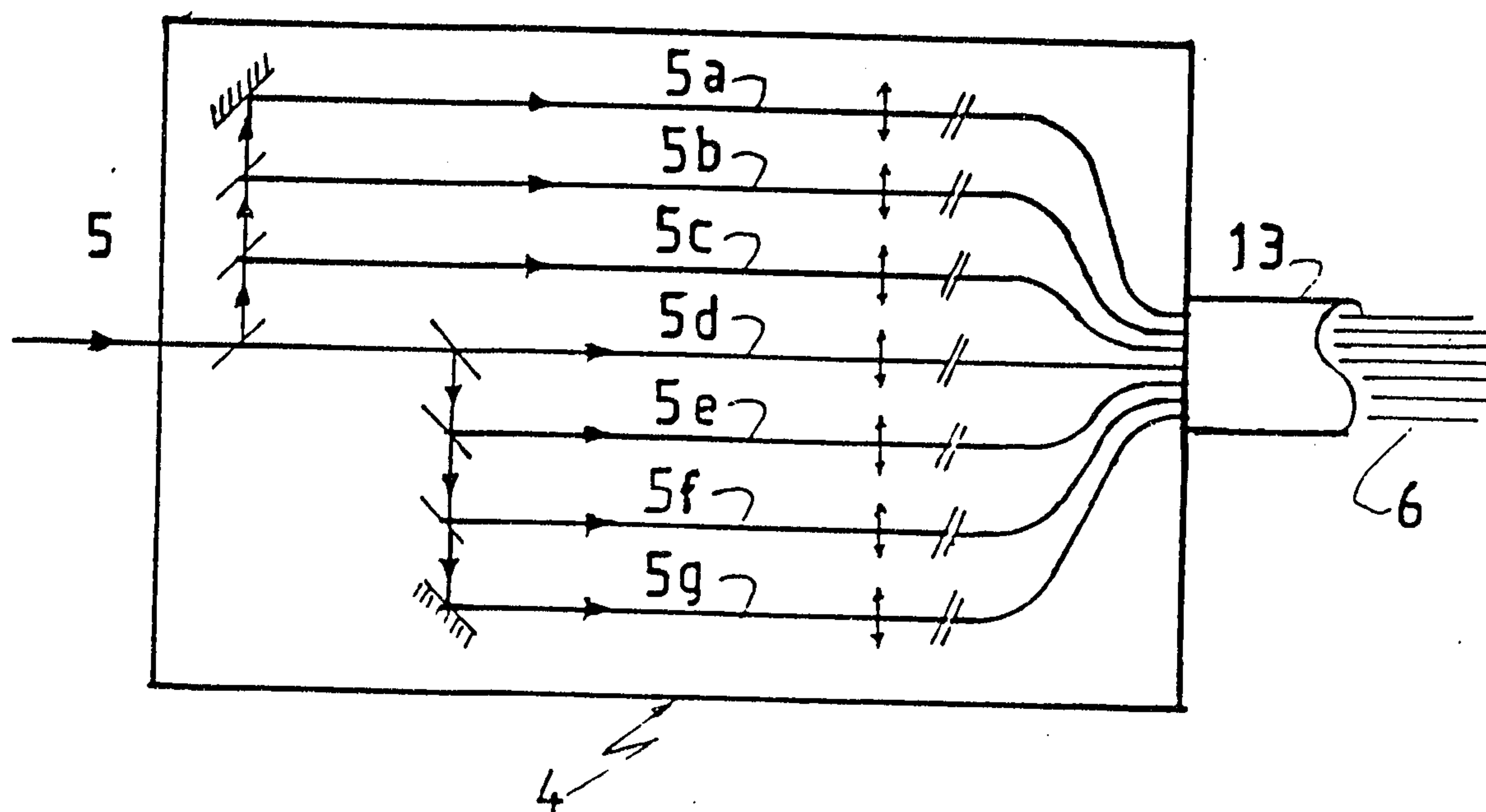
Fig. 1

Joudreau Page Dubuc & Martinson Walker

2/2



— Fig. 2 —



— Fig. 3 —

Particle Size Detector & Particle Walker