

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
26 février 2004 (26.02.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/017020 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : G01B 11/25

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2003/002070

(22) Date de dépôt international : 3 juillet 2003 (03.07.2003)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
02/08969 16 juillet 2002 (16.07.2002) FR

(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US)
: ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE
MECANIQUE ET D'AEROTECHNIQUE [FR/FR];

1, avenue Clément Ader, BP 40109, Téléport 2, F-86961
Chasseneuil-Futuroscope (FR). **CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS**
[FR/FR]; 3, rue Michel Ange, F-75016 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **BRIL-
LAUD, Jean** [FR/FR]; 15, rue du Noyer au Roy, F-86240
Liguge (FR). **LAGATTU, Fabienne** [FR/FR]; 98, rue du
Haut des Sables, F-86000 Poitiers (FR).

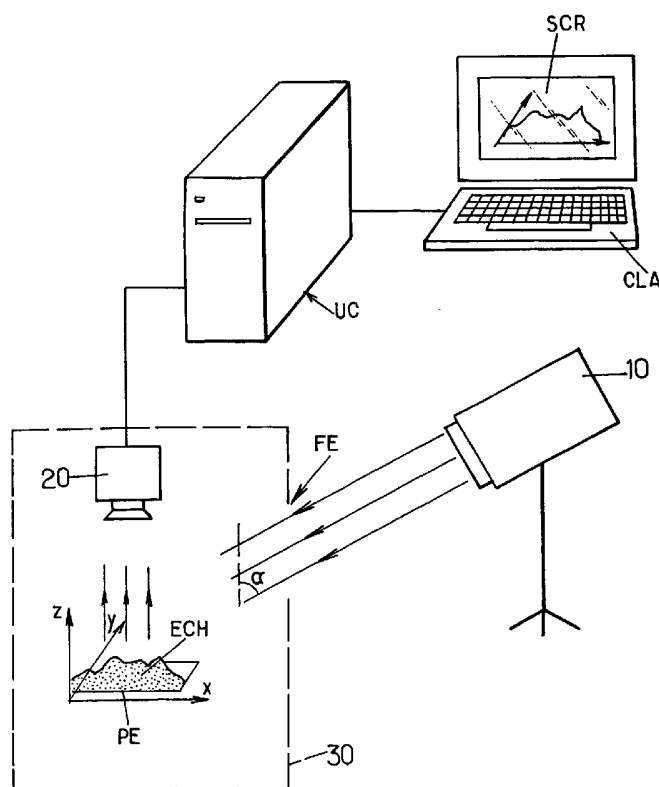
(74) Mandataires : **LOISEL, Bertrand** etc.; Cabinet Plasser-
aud, 65/67, rue de la Victoire, F-75440 Paris Cedex 09
(FR).

(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: DEVICE FOR MEASURING THE RELIEF VARIATIONS OF AN OBJECT

(54) Titre : DISPOSITIF POUR MESURER DES VARIATIONS DANS LE RELIEF D'UN OBJET



(57) Abstract: The invention relates to measuring the relief variations of an object and/or to the deformations of said object in the direction of the relief thereof (z). The inventive measuring device comprises an inclined optical projection means (10) for displaying the reference image of a rough plastering whose grains are pseudo-randomly distributed, and visualisation means (20) for obtaining the test image of the thus illuminated object. The position variations of the grains of the rough plastering between the test image and the reference image which represent the variations in the relief of the object are measured by correlation with the aid of comparison means.

(57) Abrégé : L'invention concerne la mesure du relief d'un objet et/ou des déformations de cet objet dans une direction de relief (z). A cet effet, un dispositif de mesure comporte des moyens de projection optique (10), en incidence oblique, d'une image de référence représentant un mouchetis dont les grains sont répartis pseudo-aléatoirement et des moyens de prise de vue (20) pour obtenir une image d'analyse représentant l'objet ainsi éclairé. Des moyens de comparaison (UC) mesurent, par corrélation, des variations de position des grains du mouchetis entre l'image d'analyse et l'image de référence, représentatives de variations dans le relief de l'objet.



DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés (régional) :** brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK,

TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)) pour US seulement*

Publiée :

— *avec rapport de recherche internationale*

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

Dispositif pour mesurer des variations
dans le relief d'un objet

L'invention concerne la mesure du relief d'un
5 objet et/ou des déformations d'un objet dans une direction
de relief de cet objet, par techniques optiques.

La connaissance des lois de comportement des
matériaux est aujourd'hui nécessaire, notamment dans le
domaine de la mécanique précise et de la conception de
10 pièces dans de tels matériaux. D'une manière générale, il
est préférable de mesurer le relief sur la surface entière
d'un objet, ou encore des champs complets de déformations
ou de contraintes à la surface de cet objet, par des
techniques non destructrices, typiquement des techniques
15 optiques.

Parmi ces techniques optiques, on connaît
notamment par la publication :

- *"Applications industrielles du moiré d'ombre et de
projection à la limite des possibilités techniques",*
20 A.AUBOIN, V.VALLE, F.BREMAND (Congrès Photomécanique 2001,
Futuroscope (France), avril 2001) ;

une mesure du relief à partir d'un moiré d'ombre. Cette
technique consiste à projeter optiquement sur la surface
d'un objet à analyser l'image d'un réseau de traits
25 parallèles espacés d'un pas constant. Dans une direction
d'observation formant un angle avec la normale de la
surface analysée, on constate des lignes de niveau
caractérisant le relief de l'objet.

Cependant, cette technique, même si elle permet
30 d'obtenir rapidement des mesures satisfaisantes en
macromécanique, n'est pas suffisamment précise pour

mesurer des variations du relief de l'ordre de quelques microns, l'une des meilleures performances atteintes étant une précision de l'ordre de 20 microns.

Une autre approche intéressante, mais qui
5 toutefois ne permet pas de déterminer une variation dans le relief d'un objet, consiste en l'application physique d'un mouchetis sur la surface à analyser de l'objet.

Le mouchetis comporte habituellement des grains de couleur contrastant avec le fond du mouchetis (par exemple
10 des grains noirs sur fond blanc). Il se retire, après l'analyse de l'objet, par application d'un solvant.

La technique proposée, dont des détails de réalisation sont exposés dans :

- *"White light speckle correlation applied to strain
15 measurement in notched composites"*, F.LAGATTU, T.Q.LAM, J.BRILLAUD, M.C.LAFARIE-FRENOT (ECCM 10, Brugge (Belgique), 2002) ;

permet en particulier de mesurer des déformations de l'objet dans le plan moyen de sa surface.

20 A cet effet, on numérise les images respectives, avant déformation et après déformation, de la surface de l'objet revêtue du mouchetis. On mène ensuite un calcul de corrélation sur une pluralité de groupes de pixels comportant chacun une centaine de taches de mouchetis, ce
25 qui permet d'identifier les grains du mouchetis et de discriminer ceux qui se sont déplacés par effet de la déformation. On mesure alors des déplacements localisés des grains du mouchetis, ces déplacements caractérisant des déformations localisées de l'objet dans le plan de sa
30 surface.

Néanmoins, comme indiqué ci-avant, cette technique permet de mesurer des déformations dans le plan moyen (x,y) de la surface de l'objet et non pas dans une direction de relief (z), perpendiculaire à la surface de l'objet.

De plus, l'application d'une couche de mouchetis, avant analyse, puis d'un solvant pour retirer cette couche, après analyse, augmente le nombre d'étapes dans le procédé qui est mis en œuvre pour obtenir les mesures.

La présente invention vient améliorer la situation.

Elle propose à cet effet un dispositif de mesure du relief d'un objet et/ou des déformations d'un objet dans une direction de relief de cet objet, comportant :

- des moyens de projection optique sur l'objet d'une image de référence représentant un motif de forme sensiblement pseudo-aléatoire, prédéterminée ;
- des moyens de prise de vue pour obtenir au moins une image d'analyse représentant l'objet éclairé par lesdits moyens de projection optique, les moyens de prise de vue et les moyens de projection optique formant avantageusement un angle par rapport à l'objet ; et
- des moyens de comparaison agencés pour mesurer, par corrélation, des variations de forme du motif entre l'image d'analyse et l'image de référence, ces variations de forme étant représentatives de variations dans le relief de l'objet.

Dans un mode de réalisation préféré, l'image de référence représente un mouchetis dont les grains sont répartis sensiblement pseudo-aléatoirement. Les moyens de comparaison sont alors agencés pour mesurer des écarts de

distance entre les positions respectives des grains dans l'image de référence et dans l'image d'analyse.

Avantageusement, les images de référence et d'analyse sont numériques et les moyens de comparaison
5 sont agencés pour évaluer la corrélation précitée sur une pluralité de groupes respectifs comportant un nombre choisi de pixels, de l'image de référence et de l'image d'analyse.

Dans la réalisation où le motif précité est un
10 mouchetis, les grains du mouchetis étant dans cette réalisation de diamètres de l'ordre de quelques dizaines de microns, les groupes de pixels précités comportent au moins 1000 pixels tandis que la taille d'un pixel est voisine d'une dizaine de microns de côté. De façon
15 avantageuse, on obtient alors une précision de mesure du relief ou de déplacements dans le relief inférieure à la taille d'un pixel et de l'ordre du micron.

De plus, en projetant optiquement seulement une image sur l'objet, représentant un motif de forme pseudo-
20 aléatoire tel qu'un mouchetis, on évite de détériorer l'objet, d'une part, et d'appliquer physiquement une couche de mouchetis sur la surface de l'objet, d'autre part.

D'autres caractéristiques et avantages de
25 l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée ci-après, et des dessins annexés sur lesquels :
- la figure 1 illustre un dispositif pour mesurer le relief d'un objet ou des déformations locales de cet objet dans une direction de relief, au sens de la présente
30 invention ;

- la figure 2 représente schématiquement des moyens 10 que comprend le dispositif de mesure, capables de projeter optiquement l'image d'un motif pseudo-aléatoire, sous la forme d'un mouchetis MT dans une réalisation préférée de l'invention, sur la surface de l'objet ;
- les figures 3A et 3B représentent respectivement une surface plane éclairée et la surface de l'objet éclairée par les moyens de projection précités, ladite surface de l'objet présentant un relief à mesurer ;
- la figure 4 illustre schématiquement la relation entre une déformation dx du motif pseudo-aléatoire projeté et une variation dz dans le relief de l'objet ;
- la figure 5 représente schématiquement l'allure du motif dans une zone d'image de référence comprenant N pixels ;
- la figure 6A représente schématiquement une pluralité de zones d'image de l'objet éclairé par les moyens de projection ;
- la figure 6B représente schématiquement l'objet selon la coupe B-B de la figure 6A ;
- la figure 6C représente schématiquement l'objet selon la coupe C-C de la figure 6A ; et
- la figure 6D représente schématiquement l'objet selon la coupe D-D de la figure 6A.

On se réfère tout d'abord à la figure 1, sur laquelle un objet ECH repose sur un porte-échantillon PE, agencé avantageusement pour se déplacer dans un plan xy perpendiculaire à une direction de relief z de l'objet ECH. Dans une réalisation préférée, le dispositif de mesure de relief au sens de la présente invention comprend un ordinateur classique équipé d'une unité centrale UC, comprenant un microprocesseur, une mémoire vive, une

mémoire morte et au moins une carte graphique (non représentés). L'unité centrale est reliée à un organe de saisie, tel qu'un clavier CLA, et à un moniteur d'affichage SCR, respectivement pour ordonner les début et fin de mesure et pour visualiser les reliefs de l'objet qui sont finalement représentés sur l'écran SCR.

Par ailleurs, des moyens de prise de vue 20, qui sont dans l'exemple décrit un appareil photographique numérique, sont reliés à la carte graphique de l'unité centrale pour acquérir des images de l'objet ECH.

Préférentiellement, l'appareil photographique numérique 20, le porte-échantillon PE et l'objet ECH qu'il supporte sont disposés dans une enceinte sensiblement opaque 30, préférentiellement une chambre noire de manière à limiter les réflexions optiques parasites susceptibles de dégrader la qualité des mesures de relief effectuées.

L'enceinte opaque 30 comporte néanmoins une fenêtre FE transparente pour recevoir un éclairage issu de moyens de projection 10 que comporte en outre le dispositif au sens de la présente invention. A titre d'exemple non limitatif, ces moyens d'éclairage 10 comportent :

- une lampe d'éclairage en lumière blanche ;
- un film celluloïd représentant un motif pseudo-aléatoire, disposé devant la lampe d'éclairage en transparence, à la manière d'une diapositive classique ;
- le cas échéant, des moyens de focalisation de l'éclairage sur l'objet dont on mesure le relief ; et
- un trépied pour positionner les moyens de projection 10 de sorte que l'incidence α de l'éclairage délivré soit sensiblement oblique.

En se référant à la figure 1, les rayons optiques issus des moyens de projection 10 forment un angle α non nul par rapport à l'axe z représentant la direction de relief de l'objet ECH.

5 En se référant maintenant à la figure 2, les moyens de projection 10 sont agencés pour projeter une image de référence MT, sur la surface de l'objet ECH. Cette image de référence MT représente préférentiellement un mouchetis comportant des grains noirs sur fond blanc.

10 Les grains sont répartis de façon aléatoire dans ce mouchetis. Néanmoins, l'image de référence MT est au préalable enregistrée, sous forme numérisée, dans une mémoire de l'unité centrale UC. Cette mémoire stocke en outre les instructions d'un logiciel de reconnaissance de

15 forme de sorte que la mise en œuvre du logiciel permet d'identifier la position statistique des grains du mouchetis. Ainsi, les positions respectives des grains GR du mouchetis, dans l'image de référence MT, sont bien connues. On qualifie pour cette raison le motif que

20 représente l'image de référence MT de "pseudo-aléatoire". La répartition des grains n'est, en principe, jamais identique d'une zone du mouchetis à l'autre, mais la position des grains dans le mouchetis est toujours connue.

Lorsque l'image projetée MT rencontre un relief

25 (creux ou bosse) à la surface de l'objet ECH, on comprend que les grains du mouchetis changent de position dans le plan xy. Les moyens de prise de vue 20, disposés au-dessus du plan xy, captent une image d'analyse de l'objet ainsi éclairé par les moyens de projection 10. Cette image

30 d'analyse est ensuite mémorisée (en mémoire vive ou en mémoire morte) dans l'unité centrale UC.

Par ailleurs, on a projeté au préalable l'image de référence MT (figure 2) sur une surface plane, régulière. Elle est aussi captée par lesdits moyens de prise de vue 20 et mémorisée, en tant qu'image de référence, 5 préférentiellement dans la mémoire morte de l'unité centrale UC. Ainsi, par comparaison entre l'image de référence et l'image d'analyse, on constate des différences de position des grains du mouchetis dans le plan xy, en présence d'un relief à la surface de l'objet 10 ECH.

Les rayons optiques issus des moyens de projection 10 sont agencés autour d'un plan xz, perpendiculaire à la direction y (figure 1). Les variations de position des grains sont mesurées alors le long d'une direction de 15 l'image d'analyse (ici l'axe x), correspondant sensiblement à une parallèle à la trace du plan d'incidence (ici le plan xz) sur la surface de l'objet éclairée par les moyens de projection 10.

De plus, les variations de position des grains GR 20 sont mesurées en valeurs algébriques dans un sens sensiblement opposé au sens d'éclairement des moyens de projection 10 sur la surface de l'objet ECH.

Ainsi, une différence en valeur algébrique dans la position des grains du mouchetis, le long de l'axe x, sera 25 représentative d'un relief (creux ou bosse) à la surface de l'objet ECH, ou encore d'une déformation locale sur cette surface.

La figure 3B, par comparaison avec la figure 3A, montre l'action d'un relief REL à la surface de l'objet 30 ECH, ou encore de déplacements hors-plan à la surface de l'objet, sur l'image du mouchetis MT, en une pluralité de

zones de mesure, à la surface de l'objet. En une zone de mesure A, qui présente une variation de hauteur dz, hors du plan xy, l'image du mouchetis MT se sera déplacée (ou déformée) d'une distance dx, le long de l'axe x, tel que
5 représenté sur la figure 3A. Ainsi, mesurer des vecteurs déplacement hors plan de l'objet ECH en toutes zones de sa surface revient à mesurer des vecteurs déplacement des grains du mouchetis dans le plan xy en chacune de ces zones.

10 En se référant en particulier à la figure 4, en mesurant le déplacement d'un ou plusieurs grains du mouchetis MT, dans la zone A, on en déduit, connaissant l'angle α de projection optique du mouchetis sur la surface de l'objet ECH, le déplacement hors plan en cette
15 zone A (par variation du relief REL de l'objet ou encore par déformation locale à la surface de l'objet dans cette direction de relief). Ce déplacement hors plan s'obtient par la formule suivante :

$$dz = -dx / \tan(\alpha) \quad (1)$$

20 où :

- dz correspond à une variation de hauteur du relief,
- dx correspond à une variation de position des grains le long de l'axe x, dans l'image d'analyse par rapport à l'image de référence,
- 25 - α correspond à l'angle d'incidence (non nul) que forment sensiblement les rayons issus des moyens de projection 10 avec l'axe z perpendiculaire à la surface éclairée de l'objet, et
- tg correspond à la fonction mathématique "tangente" d'un
30 angle.

Pour obtenir une cartographie des déformations hors plans à la surface de l'objet, dans le cas où cette déformation est homogène dans l'épaisseur e_0 de l'objet (figure 3B et figure 4), on utilise plus précisément l'équation suivante :

$$\varepsilon_z = -2dx / (e_0 \operatorname{tg}(\alpha)) \quad (2)$$

où :

- ε_z correspond à une déformation locale, hors-plan et supposée homogène dans l'épaisseur de l'objet, dans une zone A de l'objet,
- e_0 correspond à l'épaisseur initiale de l'objet, sans déformation, en cette zone A,
- dx correspond à une variation de position des grains le long de l'axe x , dans un second cliché (pendant la déformation) par rapport à un premier cliché (avant déformation), mesurée en valeur algébrique dans la zone A,
- α correspond à l'angle d'incidence (non nul) que forment sensiblement les rayons issus des moyens de projection avec l'axe z perpendiculaire à la surface éclairée de l'objet, et
- tg correspond à la fonction mathématique "tangente" d'un angle.

Ainsi, en comparant les positions respectives des grains du mouchetis MT, dans l'image de référence (projection optique du mouchetis sur une surface plane), d'une part, et dans l'image d'analyse (projection optique du mouchetis sur la surface de l'objet), d'autre part, il est possible d'obtenir le déplacement hors plan en toutes zones A à la surface de l'objet et, de là, une cartographie complète du relief de l'objet.

De même, en comparant les positions respectives des grains du mouchetis MT, dans un premier cliché de l'objet avant déformation, d'une part, et dans un second cliché de l'objet pendant la déformation, d'autre part, il est possible d'obtenir des mesures des déformations de l'objet hors du plan xy.

Ainsi, pour obtenir le champ des déformations hors plan à la surface de l'objet ECH, il est prévu deux clichés en photographie numérique, pris par les moyens de prise de vue 20 : un premier cliché avant la déformation et un second cliché pendant la déformation. On applique ensuite la formule (2) pour obtenir les valeurs des déformations hors plan en toutes zones de l'objet ECH.

Avantageusement, la comparaison des grains dans l'image de référence et dans l'image d'analyse est obtenue en effectuant un dépouillement statistique des grains dans ces images, qui sera décrit ci-après.

En se référant maintenant à la figure 5, l'image d'analyse captée par les moyens de prise de vue 20 et numérisée est découpée en une pluralité de zones de pixels, chaque zone de pixels correspondant à une zone A du type précité, dans laquelle est mesurée une déformation hors plan et/ou une variation dans le relief de l'objet ECH analysé.

Dans l'exemple décrit, les grains noirs GR du mouchetis présentent en moyenne un diamètre compris entre 20 et 30 μm . Chaque pixel présente, dans l'exemple décrit, des dimensions de 9 μm de long, sur 9 μm de large. Ainsi, on compte en moyenne un grain GR de mouchetis réparti sur neuf pixels PI (trois pixels en longueur sur trois pixels en largeur). Préférentiellement, chaque zone de pixels ZP

comporte 40 pixels de long, sur 40 pixels de large ($N=40$), ce qui correspond à 1600 pixels par zone ZP. Ainsi, chaque zone ZP comprend en moyenne plus d'une centaine de grains GR de mouchetis, ici 178 grains GR. Ce nombre de grains GR par zone de pixels ZP est suffisant pour identifier, par 5 corrélation, les grains de l'image de référence dans l'image d'analyse. En principe, il est en effet préférable d'avoir au moins cent grains GR par "point de mesure" (donc par zone de pixels ZP) pour effectuer correctement 10 la corrélation statistique.

On peut ainsi mesurer le déplacement des grains dans la direction x , de l'image de référence à l'image d'analyse.

Dans de telles conditions et avec un angle 15 d'incidence α approprié (par exemple de l'ordre de 40°), on obtient une précision des mesures de relief et/ou de déplacements hors plan de l'ordre du micron.

Dans une réalisation préférée, les dimensions de la zone d'analyse de la surface d'un objet ECH dont le 20 relief est à mesurer sont d'environ 20 mm de long sur 20 mm de large, ce qui correspond à plus de 3000 "points de mesure" dans l'exemple décrit (correspondant chacun à une zone de pixels ZP précitée).

En se référant à la figure 6A, sur laquelle six 25 zones de pixels ZP1 à ZP6 ont été représentées, on identifie, par calcul de corrélation entre une image d'analyse et une image de référence, les grains de mouchetis GR dont les positions sont identiques entre les deux images et les grains GR dont les positions sont 30 modifiées entre les deux images (ici dans les zones de pixels ZP3 et ZP4). Dans cette figure 6A, on a représenté

les grains GR du mouchetis de l'image d'analyse en trait plein, tandis que les grains de l'image de référence sont représentés par des traits pointillés. On constate en particulier un déplacement moyen, mesuré en valeur algébrique dx_1 , des grains GR dans la zone de pixels ZP3 (vers la gauche, tel que représenté sur la figure 6A), et un déplacement moyen, mesuré en valeur algébrique dx_2 , des grains GR dans la zone de pixels ZP4 (vers la droite, tel que représenté sur la figure 6A). A partir de ces déplacements moyens dx_1 et dx_2 , on estime des variations de hauteurs moyennes dans le relief de l'objet dz_1 et dz_2 , dans des zones de la surface de l'objet correspondant à ces zones ZP3 et ZP4. Les variations de hauteur dz_1 et dz_2 sont ainsi représentatives d'une bosse suivie, dans la direction x, d'un creux, dans le relief de l'objet. Ainsi, dans la coupe B-B de la figure 6B, on observe une bosse de hauteur dz_1 dans la zone ZP3, tandis que les zones adjacentes ZP5 et ZP1 présentent un relief plat. Par ailleurs, dans la coupe D-D de la figure 6D, on observe un creux de profondeur dz_2 dans la zone ZP4, tandis que les zones adjacentes ZP2 et ZP6 présentent un relief plat. En revanche, dans la coupe C-C de la figure 6C, on observe une pente qui s'étend de la zone ZP3 à la zone ZP4, de $+dz_1$ à $-dz_2$. Le relief plat des zones adjacentes ZP1, ZP2, ZP5 et ZP6 est représenté par un trait horizontal PL (interrompu long et court).

Chaque zone de pixels ZP représente ainsi un "point de mesure" dans la surface de l'objet.

Préférentiellement, les déplacements des grains GR du mouchetis entre l'image de référence et l'image d'analyse (ou encore entre l'image avant déformation et

l'image pendant une déformation hors plan de la surface de l'objet) sont mesurés par interpolation parabolique d'une fonction de corrélation, ce qui permet d'avoir une sensibilité sub-pixel. Avantageusement, un logiciel de calcul de corrélation et d'estimation de relief et/ou de déformation hors plan, assure une interface avec l'utilisateur (notamment pour démarrer le début des mesures et la fin des mesures). Préférentiellement, ce logiciel estime le relief et/ou les déformations hors plan à partir des équations (1) et (2) définies ci-avant.

Ainsi, selon l'un des avantages que procure la présente invention, les mesures de relief ou de déformation hors plan s'effectuent de façon non destructrice et sans contact, ce qui permet d'éviter de dégrader l'objet analysé.

De plus, selon un autre avantage de la présente invention, la précision des mesures du relief ou des déformations, hors plan, le long de la direction z, offre une grande sensibilité. En particulier, une précision de l'ordre du micron a pu être obtenue dans les conditions décrites ci-avant (178 grains en moyenne de mouchetis par zone de 40x40 pixels). En outre, avec les moyens actuels des appareils photographiques numériques, la taille d'un pixel est voisine de 9 μm de long sur 9 μm de large. Avantageusement, la résolution spatiale (actuellement de 360x360 μm^2) du dispositif décrit ci-avant peut encore être améliorée avec des moyens de prise de vue encore plus performants, en particulier si la taille des pixels est encore inférieure à 9 μm x 9 μm .

Par ailleurs, les dimensions des grains du mouchetis, ici de l'ordre de quelques dizaines de microns

de diamètre, sont susceptibles d'évoluer avec les techniques d'impression de mouchetis, en particulier de diminuer. Ainsi, avec des grains GR plus fins, le nombre de pixels par zone ZP peut diminuer et il est possible
5 d'obtenir encore une meilleure résolution spatiale.

Bien entendu, la présente invention ne se limite pas à la forme de réalisation décrite ci-avant à titre d'exemple ; elle s'étend à d'autres variantes.

Ainsi, on comprendra qu'il peut être prévu en
10 outre de mesurer "*simultanément*" des déformations hors plan (suivant l'axe z) et dans le plan moyen de la surface de l'objet (plan xy). A titre d'exemple non limitatif, il peut être prévu d'appliquer physiquement une couche de mouchetis à la surface de l'objet ECH pour mesurer les
15 déplacements dans le plan xy, tandis que l'image d'un autre mouchetis est projetée optiquement sur l'objet pour mesurer les déformations hors plan suivant l'axe z comme décrit ci-avant. Les mesures simultanées sont obtenues en jouant sur les couleurs respectives des mouchetis et donc
20 notamment sur la longueur d'onde de l'éclairage par les moyens de projection 20 (grains de couleur sur fond noir). Dans un tel cas, une double corrélation peut être menée, d'une part, sur la position des grains et, d'autre part, sur la couleur des grains, identifiés par une valeur de
25 pixel associée à cette couleur.

Ainsi, on a décrit ci-avant des moyens de projection 10 capables d'émettre un mouchetis à partir d'une lumière blanche. Bien entendu, en variante, il peut être prévu une émission monochrome, notamment à partir
30 d'une source laser.

Par ailleurs, on a décrit ci-avant un objet ECH porté par un porte-échantillon PE. Avantageusement, s'il est souhaité d'analyser une pluralité de zones de la surface de l'objet (chaque zone étant de dimension de 20 mm de long sur 20 mm de large), il peut être prévu une motorisation du porte-échantillon PE, dans le plan xy, pour analyser des surfaces supérieures à 400 mm².

La configuration décrite ci-avant et selon laquelle les moyens de prise de vue 20 sont disposés en face de la surface de l'objet à analyser, tandis que la projection optique du mouchetis s'effectue en incidence oblique α , bien qu'avantageuse, peut aussi faire l'objet d'une variante selon laquelle l'incidence est normale tandis que la prise de vue est oblique. Néanmoins, il est préférable, dans toute configuration, que les moyens de prise de vue et les moyens de projection optique forment un angle α par rapport à l'objet.

On a décrit ci-avant un mouchetis en tant que motif pseudo-aléatoire. Ici, la déformation du motif projeté, créée par le relief de l'objet (aspérité, creux ou bosse à la surface de l'objet), se manifeste par un déplacement virtuel des grains du mouchetis. Bien entendu, d'autres variantes de motif pseudo-aléatoire sont envisageables. Il est préférable néanmoins que ce motif ne se reproduise pas à l'identique d'un "point de mesure" (ou d'une zone de pixels dans l'exemple décrit) à l'autre.

Revendications

1. Dispositif pour mesurer le relief d'un objet et/ou les déformations d'un objet dans une direction de relief de cet objet, caractérisé en ce qu'il comporte :
- des moyens de projection optique (10) sur l'objet d'une image de référence (MT) représentant un motif de forme sensiblement pseudo-aléatoire, prédéterminée ;
 - des moyens de prise de vue (20) pour obtenir au moins une image d'analyse représentant l'objet éclairé par lesdits moyens de projection optique, les moyens de prise de vue (20) et les moyens de projection optique (10) formant un angle (α) par rapport à l'objet ; et
 - des moyens de comparaison (UC) agencés pour mesurer, par corrélation, des variations de forme du motif entre l'image d'analyse et l'image de référence, lesdites variations de forme étant représentatives de variations (dz) dans le relief de l'objet.
2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite image de référence représente un mouchetis dont les grains (GR) sont répartis sensiblement pseudo-aléatoirement, et en ce que les moyens de comparaison sont agencés pour mesurer des écarts de distance (dx) entre les positions respectives des grains dans l'image de référence et dans l'image d'analyse.
3. Dispositif selon la revendication 2, caractérisé en ce que les moyens de comparaison sont agencés pour évaluer une corrélation entre les grains de l'image de référence

et les grains de l'image d'analyse, en vue d'identifier les grains de l'image de référence dans l'image d'analyse.

4. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que lesdites images de référence et d'analyse sont numériques, et en ce que les moyens de comparaison sont agencés pour évaluer ladite corrélation sur une pluralité de groupes respectifs (ZP) comportant un nombre choisi de pixels (N), de l'image de référence et de l'image d'analyse.

5. Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce que les moyens de comparaison sont agencés pour mesurer une variation (dx) de forme moyenne dans chaque groupe de pixels (ZP), représentative d'une variation moyenne de hauteur (dz) d'une zone de l'objet représentée par ce groupe de pixels.

6. Dispositif selon l'une des revendications 4 et 5, prises en combinaison avec l'une des revendications 2 et 3, caractérisé en ce que les grains du mouchetis sont de diamètres de l'ordre de quelques dizaines de microns, et en ce que lesdits groupes de pixels comportent au moins 1000 pixels, tandis que la taille d'un pixel est de l'ordre d'une dizaine de microns, ce qui permet d'obtenir une précision de mesure du relief ou de déplacements dans le relief de l'ordre du micron.

7. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens de prise de vue (20) sont disposés sensiblement en face d'une surface de l'objet à

analyser, tandis que les moyens de projection optique (10) sont agencés pour projeter l'image de référence (MT) en incidence sensiblement oblique (α) sur ladite surface de l'objet.

5

8. Dispositif selon la revendication 7, caractérisé en ce que les variations de forme du motif sont mesurées le long d'une direction (x) de l'image d'analyse correspondant sensiblement à une parallèle à la trace du plan d'incidence sur ladite surface de l'objet éclairée par les
10 moyens de projection.

9. Dispositif selon la revendication 8, caractérisé en ce que les variations de forme du motif sont mesurées en
15 valeurs algébriques dans un sens sensiblement opposé au sens d'éclairement des moyens de projection sur la surface de l'objet à analyser.

10. Dispositif selon la revendication 9, caractérisé en ce
20 que les moyens de comparaison sont agencés pour estimer des variations de relief à la surface de l'objet, selon la formule :

$$dz = - dx / \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

25

où :

- dz correspond à une variation de hauteur du relief,
- dx correspond à une variation de forme du motif dans l'image d'analyse par rapport à l'image de référence,

- α correspond à l'angle que forme ladite incidence oblique avec une perpendiculaire à la surface éclairée de l'objet, et
- tg correspond à la fonction mathématique "tangente" d'un angle.

11. Dispositif selon l'une des revendications 9 et 10, caractérisé en ce que les moyens de comparaison sont agencés pour estimer des déformations de l'objet dans une direction perpendiculaire à une surface d'analyse de l'objet, selon la formule :

$$\varepsilon_z = - 2dx / e_0 \text{tg}\alpha \quad (2)$$

où :

- ε_z correspond à une déformation locale, hors-plan et supposée homogène dans l'épaisseur de l'objet,
- dx correspond à une variation de forme du motif dans l'image d'analyse par rapport à l'image de référence,
- e_0 correspond à l'épaisseur initiale de l'objet, sans déformation,
- α correspond à l'angle que forme ladite incidence oblique avec une perpendiculaire à la surface éclairée de l'objet, et
- tg correspond à la fonction mathématique "tangente" d'un angle.

1/4

FIG.1.

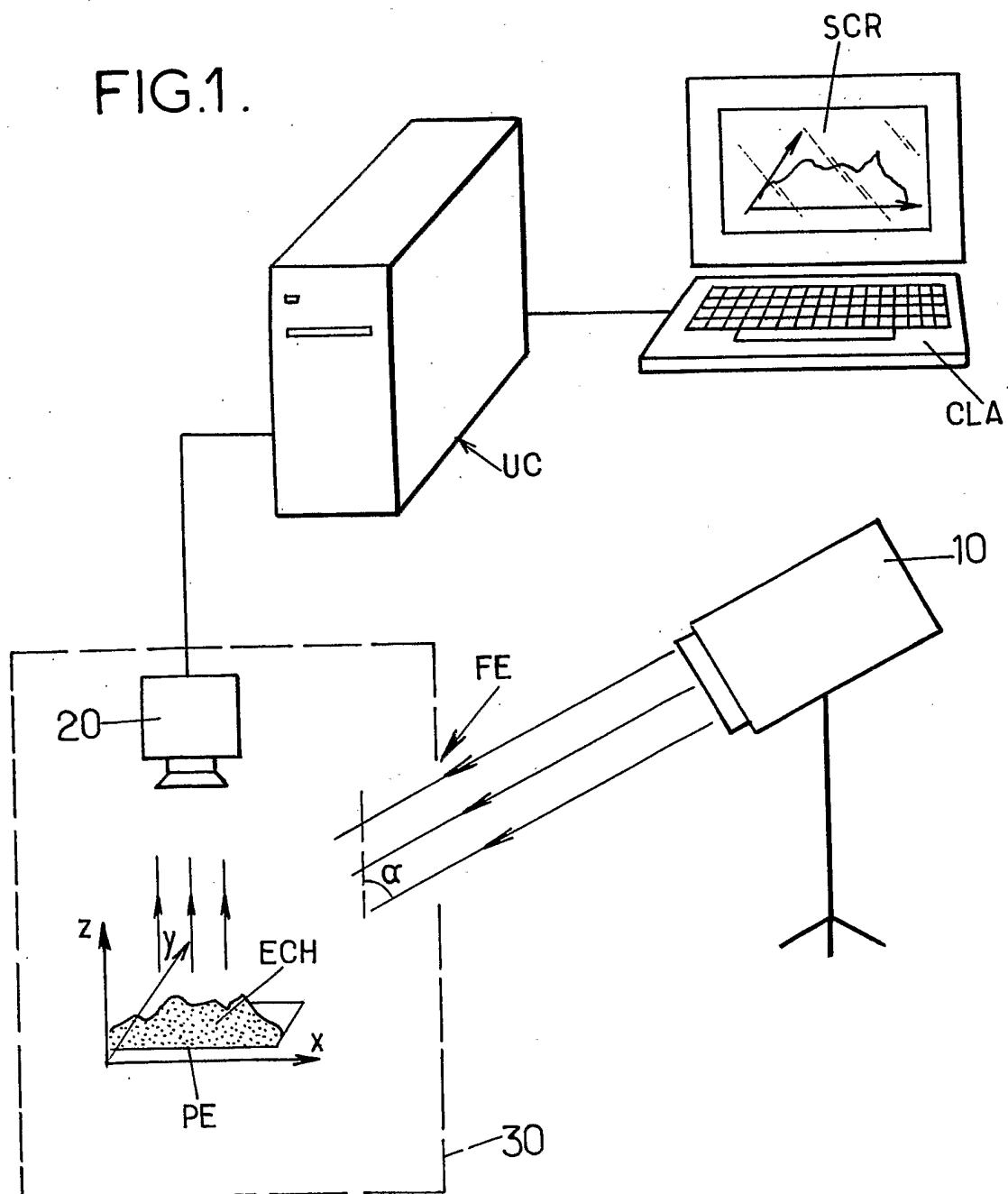


FIG.2.

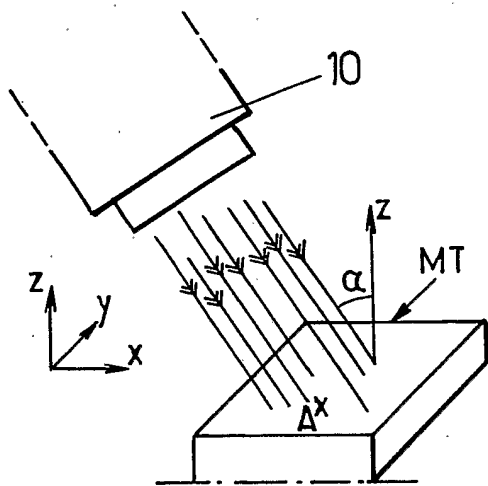
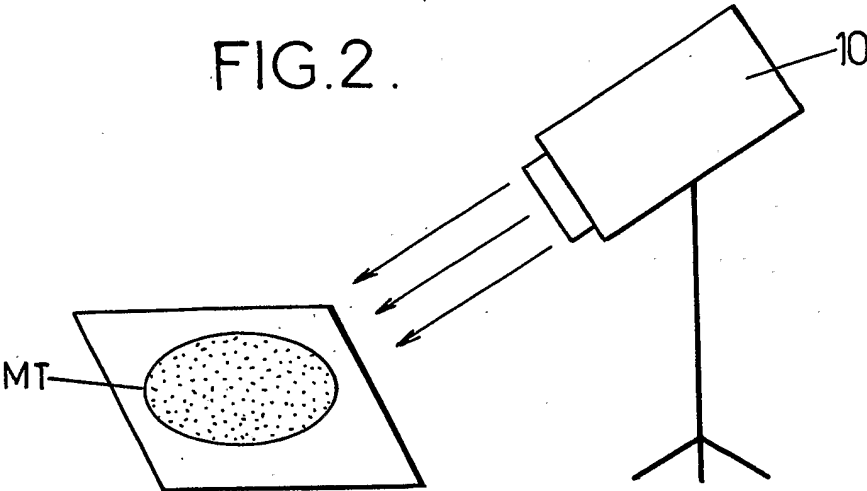


FIG.3A.

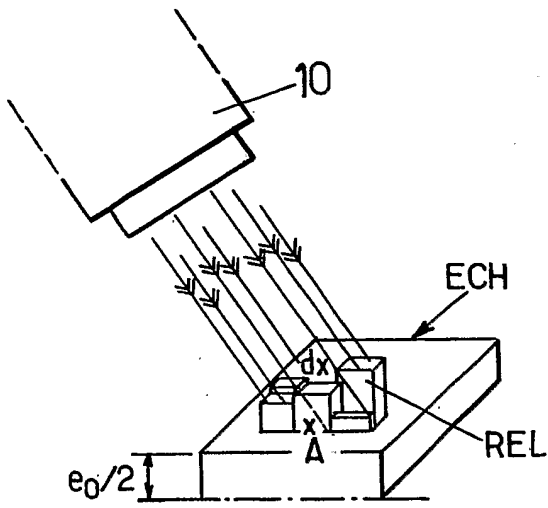


FIG.3B.

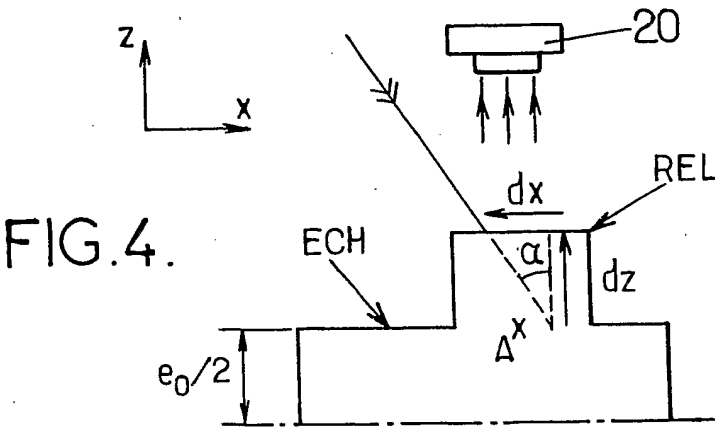


FIG.4.

3/4

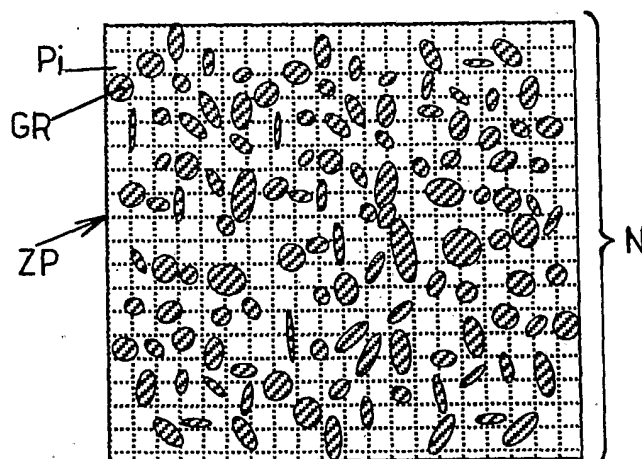


FIG. 5.

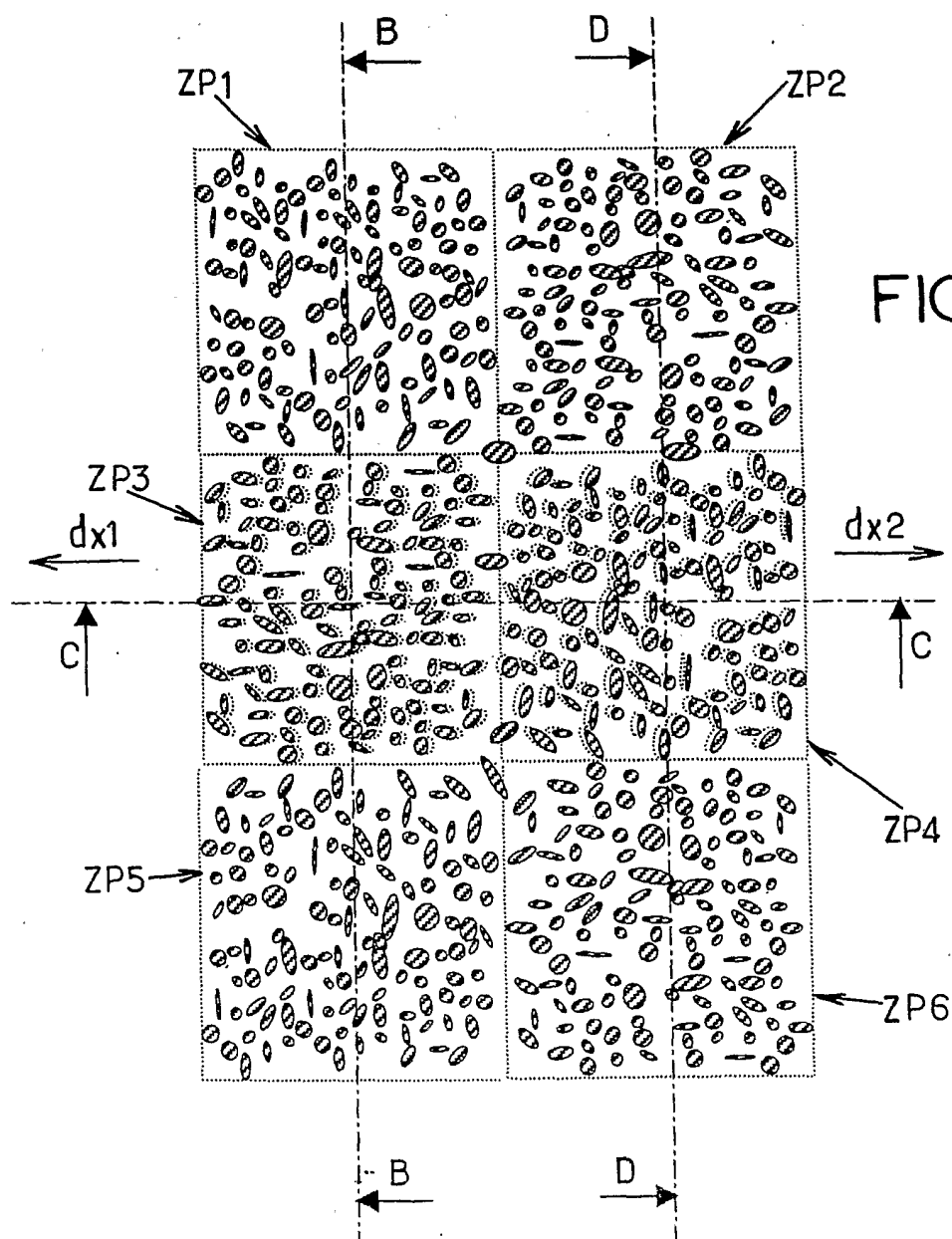


FIG. 6A.

FIG.6B.

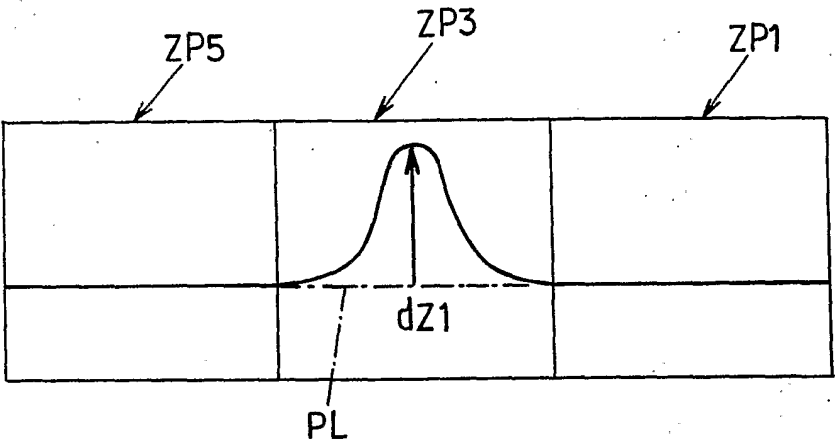


FIG.6C.

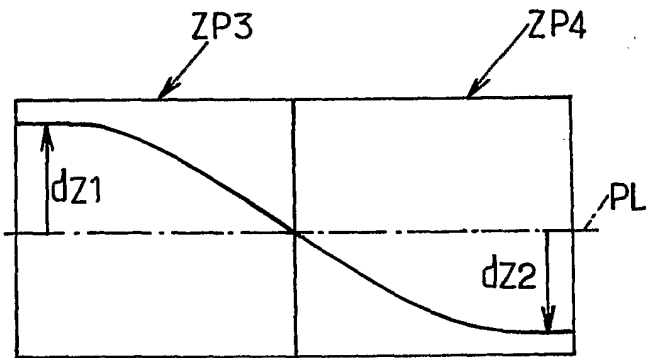
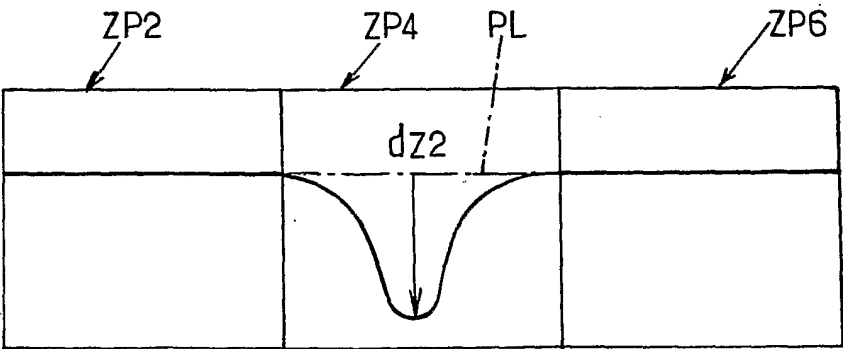


FIG.6D.



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR 03/02070

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 G01B11/25

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)

IPC 7 G01B

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

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 003 166 A (GIROD BERND) 26 March 1991 (1991-03-26) column 6, line 61 -column 7, line 14 column 9, line 46 -column 11, line 26 column 9, line 49 -column 12, line 26 figures 1A,7A,7B	1-3,7
A	---	4-6,8-11
X	EP 0 974 811 A (HEWLETT PACKARD CO) 26 January 2000 (2000-01-26) column 4, line 21 - line 26 column 5, line 14 -column 6, line 24 column 7, line 2 - line 9 column 7, line 26 - line 51 figures 1A-1E,3A-3B,5,6	1
A	---	2-11
	--- -/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in 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 document 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.

Z document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

3 November 2003

Date of mailing of the international search report

03/12/2003

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Grand, J-Y

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/FR 03/02070

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 02 40940 A (UNIV DELFT TECH ;MEENS BERNADUS CONRAD HUBERTUS (NL); VERBEEK PIET) 23 May 2002 (2002-05-23) page 3, line 29 -page 5, line 4 figures 1,2A-2B -----	1-11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/FR 03/02070

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5003166	A	26-03-1991	NONE	
EP 0974811	A	26-01-2000	EP 0974811 A1	26-01-2000
			JP 2000089092 A	31-03-2000
WO 0240940	A	23-05-2002	NL 1016617 C2	16-05-2002
			AU 2315602 A	27-05-2002
			WO 0240940 A1	23-05-2002

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/FR 03/02070

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

CIB 7 G01B11/25

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)

CIB 7 G01B

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 réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie °	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 5 003 166 A (GIROD BERND) 26 mars 1991 (1991-03-26) colonne 6, ligne 61 - colonne 7, ligne 14 colonne 9, ligne 46 - colonne 11, ligne 26 colonne 9, ligne 49 - colonne 12, ligne 26 figures 1A, 7A, 7B	1-3, 7
A	---	4-6, 8-11
X	EP 0 974 811 A (HEWLETT PACKARD CO) 26 janvier 2000 (2000-01-26) colonne 4, ligne 21 - ligne 26 colonne 5, ligne 14 - colonne 6, ligne 24 colonne 7, ligne 2 - ligne 9 colonne 7, ligne 26 - ligne 51 figures 1A-1E, 3A-3B, 5, 6	1
A	---	2-11
	--- -/-	



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



Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

° Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- *T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- *X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- *Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- *Z* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

3 novembre 2003

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

03/12/2003

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Grand, J-Y

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No
 PCT/FR 03/02070

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie	Identification des documents cités, avec,le cas échéant, l'indicationdes passages pertinents	no. des revendications visées
A	WO 02 40940 A (UNIV DELFT TECH ;MEENS BERNADUS CONRAD HUBERTUS (NL); VERBEEK PIET) 23 mai 2002 (2002-05-23) page 3, ligne 29 -page 5, ligne 4 figures 1,2A-2B -----	1-11

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale No

PCT/FR 03/02070

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5003166	A	26-03-1991	AUCUN	
EP 0974811	A	26-01-2000	EP 0974811 A1	26-01-2000
			JP 2000089092 A	31-03-2000
WO 0240940	A	23-05-2002	NL 1016617 C2	16-05-2002
			AU 2315602 A	27-05-2002
			WO 0240940 A1	23-05-2002