

(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  
3 mai 2007 (03.05.2007)

PCT

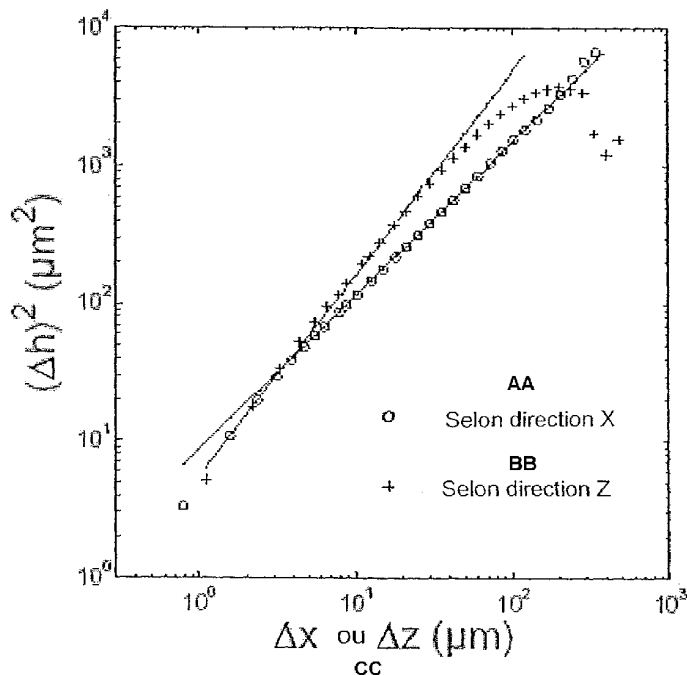
(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2007/048934 A1**

- (51) Classification internationale des brevets :  
*G01N 3/06* (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2006/002409
- (22) Date de dépôt international :  
26 octobre 2006 (26.10.2006)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :  
0511058 28 octobre 2005 (28.10.2005) FR
- (71) Déposant : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOM-  
IQUE [FR/FR]; 25, rue Leblanc, Immeuble "Le Ponant D",  
F-75015 Paris (FR).
- (72) Inventeurs: **PONSON, Laurent**; 6, rue Bordin, F-78500  
Sartrouville (FR). **BOUCHAUD, Elisabeth**; 4, rue Léon  
Delagrangé, F-75015 Paris (FR). **BONAMY, Daniel**; 17,  
rue Beaunier, F-75014 Paris (FR).
- (74) Mandataires : **BOLINCHES, Michel** etc.; Cabinet Orès,  
36, rue de St Petersburg, F-75008 Paris (FR).
- (81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de  
protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AT,  
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,  
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,  
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP,  
KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT,  
LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,  
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU,  
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR,  
TT, TZ, UA, UG, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR DETERMINING THE SPREADING PATH OF AT LEAST ONE CRACK FROM A  
BREAK SURFACE OR FROM A NUMBER OF BREAK SURFACES CREATED BY THIS/THESE CRACK(S)

(54) Titre : PROCEDE ET SYSTEME DE DETERMINATION DU PARCOURS DE PROPAGATION D'AU MOINS UNE FIS-  
SURE A PARTIR D'UNE OU DE SURFACE(S) DE RUPTURE CREEES PAR CETTE OU CES FISSURE(S)



AA....ALONG DIRECTION X  
BB... ALONG DIRECTION Z  
CC...ΔX OR ΔZ (μM)

(57) Abstract: The invention relates to a method and system for determining, in a solid structure having been broken along at least one break surface, the spreading path of at least one crack at the beginning thereof or each break surface. The inventive method comprises: a) a step for acquiring topographical data of the or each surface, either in one case (i) by extracting height profiles along a number of directions, or in another case (ii) by acquiring a map of heights, and with a resolution for which said structure is heterogeneous and rough, characterized in that it comprises, starting with step a): an analysis of statistical properties of roughness of the or each surface that gives evidence of an anisotropy of these properties along a number of directions for deducing from this anisotropy at least one direction of spreading X of the or each crack that defines all or a portion of said path.

[Suite sur la page suivante]

WO 2007/048934 A1



(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Publiée :**

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont requises

*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.*

---

(57) **Abrégé :** La présente invention concerne un procédé et un système de détermination, dans une structure solide ayant été cassée suivant au moins une surface de rupture, du parcours de propagation d'au moins une fissure à l'origine de ladite ou chaque surface de rupture. Le procédé selon l'invention comprend une étape a) d'acquisition de données topographiques de ladite ou chaque surface, soit dans un cas (i) par extraction de profils de hauteurs selon une pluralité de directions, soit dans un cas (ii) par acquisition d'une carte des hauteurs, et avec une résolution pour laquelle ladite structure est hétérogène et rugueuse, caractérisé en ce qu'il comprend, à partir de cette étape a), une analyse des propriétés statistiques de rugosité de la ou de chaque surface qui témoigne d'une anisotropie de ces propriétés selon ladite pluralité de directions, pour déduire de cette anisotropie au moins une direction de propagation X de la ou chaque fissure qui définit tout ou partie dudit parcours.

**PROCEDE ET SYSTEME DE DETERMINATION DU PARCOURS DE  
PROPAGATION D'AU MOINS UNE FISSURE A PARTIR D'UNE OU DE  
SURFACE(S) DE RUPTURE CREEES PAR CETTE OU CES FISSURE(S).**

5 La présente invention concerne un procédé et un système de  
détermination, dans une structure solide ayant été cassée suivant au moins  
une surface de rupture, du parcours de propagation d'au moins une fissure à  
l'origine de la ou chaque surface de rupture. L'invention s'applique à tous  
types de structures solides comprenant par exemple des organes mécaniques  
10 de véhicules, des constructions décoratives ou de protection d'installations  
sensibles, des (nano)-composants utilisés dans les nouvelles technologies,  
des ouvrages de génie civil ou même la croûte terrestre.

Pour déterminer la cause d'une rupture ou fracture dans une  
15 structure solide, on peut procéder de manière connue à un examen de type  
fractographique consistant à inspecter la surface de rupture de la structure  
ayant été cassée pour essayer d'en déduire des indices sur la cause de la  
cassure. Par exemple, une striation séquentielle amorcée à un changement  
de section d'une structure peut suggérer la prédominance d'un mécanisme de  
20 fatigue, alors qu'une distorsion au niveau de la surface de rupture peut  
suggérer une rupture ductile par surcharge, etc. Cet examen fractographique  
peut être effectué à l'échelle macroscopique par inspection visuelle à  
grossissement réduit, par examen stéréoscopique ou bien à des  
grossissements beaucoup plus élevés via un microscope électronique à  
25 balayage (MEB).

Un inconvénient majeur de ces méthodes de détermination de  
l'origine d'une rupture réside dans le manque de fiabilité des indices obtenus,  
tant pour certains modes de rupture que pour certains matériaux. Elles sont  
en particulier complètement inadaptées à la rupture de matériaux fragiles  
30 comme les céramiques, le verre, les bétons, les solides monocristallins, les  
quasi-cristaux, etc., ainsi qu'à la rupture par clivage des alliages métalliques.

Depuis le travail fondateur de Mandelbrot (Mandelbrot, B. B., D. E. Passoja, et A. J. Paullay: 1984, Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature* 308, 721–722), l'étude de la morphologie des surfaces de rupture est devenue un champ de recherche très actif. Pour une grande variété de matériaux hétérogènes, on a pu conclure que les surfaces de rupture présentent des propriétés universelles, bien que les mécanismes de rupture à l'échelle microscopiques soient très différents d'un matériau à l'autre (voir Bouchaud, E.: 1997, Scaling properties of cracks. *J. Phys. Condens. Matter* 9, 4319–4344). De nombreuses études expérimentales ont en effet suggéré que les surfaces de rupture sont auto-affines sur une large gamme d'échelles de longueur, i.e. que l'évolution spatiale de la fonction de corrélation des hauteurs le long d'une direction donnée de la surface :

$$\Delta h(\Delta r) = \langle (h(r + \Delta r) - h(r))^2 \rangle_r^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{est donnée par } \Delta h / l = (\Delta r / l)^H \quad (2)$$

où  $h$  est la hauteur à l'abscisse  $r$ ,  $\Delta h$  est la différence de hauteur moyenne entre deux points distants de  $\Delta r$ , où la moyenne  $\langle \rangle_r$  est effectuée sur la position du premier point. L'exposant  $H$  est l'exposant de Hurst, appelé aussi exposant de rugosité, et la longueur  $l$  est la toposphérisie ou échelle de longueur pour laquelle  $\Delta h/l$  est égal à  $\Delta r/l$ .

Certains de ces travaux portant sur différents types de matériaux et de modes de rupture ont conclu à une valeur  $H$  universelle et isotrope de cet exposant de Hurst, qui serait sensiblement égale à 0,8. On peut notamment citer les articles suivants pour des comptes rendus détaillés de ces travaux :

- Bouchaud, E., G. Lapasset, et J. Planès: 1990, Fractal dimension of fractured surfaces: A universal value ?. *Europhys. Lett.* 13 ;

- Maloy, K. J., A. Hansen, E. L. Hinrichsen, et S. Roux: 1992, Experimental measurements of the roughness of brittle cracks. *Phys. Rev. Lett.* 68, 213–215 ;

- Schmittbuhl, J., F. Schmitt, et C. Scholz: 1995, Scaling invariance of crack surfaces. *J. Geophys. res.* 100, 5953–5973 ; et

- Daguier, P., B. Nghiem, E. Bouchaud, et F. Creuzet: 1997, Pinning and depinning of crack fronts in heterogeneous materials. Phys. Rev. Lett. 78, 1062–1065.

5                    Au cours de ses recherches sur les propriétés statistiques de rugosité des surfaces de rupture auto-affines de structures solides, la Demanderesse a cherché à analyser des données topographiques de ces surfaces, données acquises soit dans un cas (i) par extraction de profils de hauteurs selon une pluralité de directions, soit dans un cas (ii) par acquisition  
10 d'une carte des hauteurs, et dans les deux cas avec une résolution pour laquelle la structure est hétérogène et rugueuse (étape a) d'acquisition ci-après), pour l'obtention d'éventuelles propriétés de rugosité anisotropes de ces surfaces susceptibles de permettre une reconstitution fiable du parcours d'une fissure dans la structure.

15                    Ce but vient d'être atteint en ce que la Demanderesse a découvert d'une manière inattendue que, si l'on se place suffisamment loin de l'initiation de la fissure et indépendamment du matériau considéré (e.g. que celui-ci soit de type fragile, quasi-fragile ou ductile), du mode de rupture (e.g. corrosion sous contrainte, fatigue, rupture quasi-statique, rupture dynamique)  
20 et de la vitesse de propagation de la fissure, l'exposant de Hurst calculé parallèlement à la direction de propagation de la fissure présente une valeur  $\beta$  nettement inférieure à sa valeur  $\zeta$  calculée parallèlement au front de la fissure et que, de manière plus approfondie, cette anisotropie de l'exposant de Hurst peut être généralisée par une loi d'évolution spatiale spécifique d'une fonction  
25 de corrélation à deux dimensions des profils extraits qui met en jeu ces deux exposants de Hurst  $\zeta$ ,  $\beta$  et un troisième exposant  $\kappa$  qui est sensiblement égal à  $\zeta/\beta$ .

30                    On notera que, contrairement à l'enseignement de la littérature existante, la Demanderesse a pu établir que les propriétés

d'invariance d'échelle d'une surface de rupture auto-affine sont anisotropes, ceci pour une large gamme de matériaux et de modes de rupture différents.

Ainsi, le procédé de détermination selon l'invention, dans une structure solide, de tout ou partie du parcours de propagation d'au moins une fissure ayant cassé ladite structure solide suivant une ou plusieurs surface de rupture, comprend, à partir de ladite étape a), une analyse des propriétés statistiques de rugosité de la ou de chaque surface qui témoigne d'une anisotropie de ces propriétés selon une pluralité de directions, pour déduire de cette anisotropie au moins une direction de propagation X de la ou chaque fissure qui définit tout ou partie dudit parcours et pour laquelle l'exposant de Hurst de ladite surface présente une valeur minimale  $\beta$  en comparaison de celle relative aux autres directions de ladite pluralité de directions.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ledit procédé peut comprendre, suite à l'étape a), les étapes suivantes :

b) détermination :

- soit pour lesdites directions dans le cas (i) précité de l'étape a), d'au moins une propriété statistique de rugosité de ladite surface qui est représentative de l'évolution spatiale d'une fonction de corrélation des profils extraits en a) et qui comprend des valeurs de l'exposant de Hurst de ladite surface correspondant respectivement auxdites directions,

- soit pour ladite carte dans le cas (ii) précité de l'étape a), d'au moins une propriété statistique de rugosité de ladite surface qui est représentative de l'évolution spatiale de sa fonction de corrélation ;

c) comparaison de la ou des propriétés déterminées en b) à des valeurs de référence de celle(s)-ci, lesquelles sont représentatives d'une évolution spatiale de référence  $\Delta h$  de ladite fonction de corrélation qui est spécifique à des directions X de propagation de fissures ; puis

d) détermination de la ou des directions de propagation X, pour lesquelles cette comparaison témoigne d'une similarité entre propriété(s)

visée(s) en b) et c) ou entre évolutions des fonctions correspondantes, et qui définissent tout ou partie dudit parcours de propagation.

On notera que ce procédé de détermination selon l'invention  
5 du parcours d'une fissure s'applique d'une manière générale à tout type de matériau, excepté à un cristal parfait cassé à suffisamment basse température, de sorte que la surface de rupture soit confondue avec un plan de clivage de ce cristal. Il est cependant à noter que le procédé de détermination selon l'invention à été appliqué avec succès au clivage de  
10 quasi-cristaux.

On notera également que ce procédé selon l'invention ne permet pas de déterminer directement le sens de propagation de la fissure, mais que ce sens peut être déduit de manière indirecte à partir du parcours reconstitué de la fissure.

15 Il est préférable de mettre en œuvre le procédé à différents emplacements, afin de déterminer la direction locale X de propagation et de reconstituer le parcours de la fissure jusqu'à son origine.

Dans le cas d'une structure ayant été cassée par plusieurs fissures, on notera que le procédé selon l'invention peut être mis en œuvre  
20 sur chacune des surfaces de ruptures.

L'étape a) d'acquisition de données topographiques peut être mise en œuvre par des techniques « 1D » ou « 2D », qui correspondent respectivement à l'acquisition de profils sous forme de lignes ou sous forme  
25 de cartes en relief.

Il est essentiel de noter que cette acquisition de données topographiques doit être réalisée à une échelle pour laquelle la surface de rupture est rugueuse qui, en fait, peut aller de quelques fractions (e.g. du dixième, du centième ou du millième suivant la résolution du dispositif utilisé  
30 pour l'acquisition de la topographie) à quelques fois (e.g. une dizaine de fois) la plus grande échelle caractéristique de la microstructure du matériau hétérogène constitutif de la structure considérée.

Pour un matériau métallique, les relevés topographiques doivent avoir une précision ou résolution qui est au plus de l'ordre du centième, voir du millième de la taille moyenne des grains, et le relevé topographique obtenu correspond avantageusement à quelques grains (trois ou quatre grains suffisent).

Pour un matériau en bois, la résolution peut correspondre à la taille des cellules, et pour le béton à celle des grains de sable.

Pour les matériaux amorphes, tels que le verre ou les nanocéramiques, le relevé topographique est réalisé avec une résolution de la taille typique du désordre (e.g. de l'ordre du milliardième de mètre dans le verre et de quelques dizaines de milliardième de mètre dans les nanocéramiques), la taille du relevé étant avantageusement égale à une centaine de fois cette taille.

D'une manière générale, l'homme du métier saura déterminer la résolution des relevés, pour que ceux-ci soient adaptés à la taille des microstructures présentes sur la surface de rupture de la structure considérée.

De préférence, l'étape a) d'acquisition de la topographie est d'une manière générale mise en œuvre par une technique choisie dans le groupe constitué par la profilométrie mécanique (e.g. mise en œuvre via un stylet ou palpeur), la profilométrie optique (e.g. mise en œuvre par des techniques interférométriques, stéréoscopiques ou confocales couplées à de la microscopie classique ou de la microscopie électronique à balayage) et la microscopie à champ proche (e.g. microscopie à force atomique, microscopie à effet tunnel, microscopie optique en champ proche).

Le type de profilométrie utilisée sera avantageusement adapté au matériau constitutif de la structure étudiée. La profilométrie mécanique est particulièrement adaptée à des matériaux tels que le béton, les roches ou le bois, la méthode stéréoscopique couplée à la microscopie à balayage est particulièrement adaptée aux matériaux métalliques, alors que la microscopie à champ proche est particulièrement adaptée aux matériaux amorphes, tels que les verres, les quasi-cristaux et les nanocéramiques.



Selon un premier mode de réalisation de l'invention, les fonctions de corrélation visées en b) et c) sont chacune à une dimension, et les directions X déterminées en d) sont celles pour lesquelles l'exposant de Hurst présente une valeur minimale  $\beta$  en comparaison de celle relative aux autres directions de ladite pluralité de directions.

En effet, la Demanderesse a mis en évidence que l'exposant de Hurst présente une valeur  $\beta$  sensiblement égale à 0,60 dans lesdites directions X de propagation de la ou chaque fissure, alors que ce même exposant de Hurst présente une valeur  $\zeta$  sensiblement égale à 0,75 dans des directions Z qui correspondent au front de ladite ou chaque fissure et qui sont orthogonales auxdites directions X de propagation.

Conformément à ce premier mode selon l'invention, pour un relevé topographique de type « 2D » à acquérir à l'étape a), on « soustrait » de préférence le plan moyen de la surface de rupture afin d'assurer la planéité moyenne de cette surface et l'on extrait les profils de hauteurs selon ladite pluralité de directions. Pour un relevé topographique de type « 1D », on « soustrait » de préférence la pente moyenne à chacun des profils obtenus et l'on effectue des relevés dans ladite pluralité de directions. Dans ces deux cas, lesdits profils de hauteurs extraits comprennent au moins 100 points de mesure pour chacune de ladite pluralité de directions.

Ensuite, pour chacune de ces directions, on calcule à l'étape b) la fonction de corrélation des hauteurs - par exemple de type « 1D » - le long des profils selon la formule (1) précitée, où h est la hauteur à l'abscisse r par rapport à une référence choisie de préférence proche du plan moyen de rupture. Cette fonction évolue de la façon suivante :

$$\Delta h(\Delta r) \sim \Delta r^H \quad (3)$$

où le signe  $\sim$  signifie « proportionnel à » et l'exposant H est l'exposant de Hurst ou exposant de rugosité.

On détermine ainsi l'exposant de Hurst dans ladite pluralité de directions, de préférence au moyen d'un programme d'ordinateur.

Comme indiqué ci-dessus en référence à l'étape d), les directions pour lesquelles la valeur de cet exposant de Hurst est minimale correspond aux directions X de propagation.

On notera que les profils de hauteurs extraits à l'étape a) doivent être composés d'un nombre de points suffisant, de préférence au moins une centaine de points pour chacune des directions. En effet, le nombre de profils pour une même direction augmente la précision de la valeur de l'exposant de Hurst H, et il faut pour cela moyenner  $\Delta h$  correspondant à une valeur de  $\Delta r$  donnée sur l'ensemble des profils.

Selon la précision que l'on souhaite obtenir, on effectuera les mesures et calculs précités sur un nombre de directions choisi en conséquence. Par exemple avec au moins 20 directions choisies, la précision théorique de chaque direction de propagation X pourra être inférieure ou égale à  $\pm 10$  degrés.

Selon un second mode de réalisation de l'invention, les fonctions de corrélation visées en b) et c) sont chacune à deux dimensions, sont calculées avantageusement à partir d'une carte des hauteurs, et les directions X déterminées en d) sont celles pour lesquelles l'évolution spatiale de la fonction de corrélation  $\Delta h(\Delta Z, \Delta X)$ , qui est définie par la relation :

$$\Delta h(\Delta Z, \Delta X) = \langle [h(Z+\Delta Z, X+\Delta X) - h(Z, X)]^2 \rangle_{Z, X}^{1/2} \quad (4)$$

est en fait de la forme :

$$\Delta h(\Delta Z, \Delta X) = \Delta X^\beta f(\Delta Z / \Delta X^{1/\kappa}) \quad (5) \quad \text{où :}$$

$\Delta Z$  et  $\Delta X$  correspondent alors à des incréments dans les directions orthogonales Z et X, qui correspondent respectivement aux directions du front de ladite ou chaque fissure et aux directions de propagation de celle-ci,

$\beta$  est la valeur minimale de l'exposant de Hurst dans lesdites directions X de propagation de la ou chaque fissure,

f est une fonction de  $\Delta Z$  et  $\Delta X$  satisfaisant à  $f(u) \sim 1$  si  $u \ll c$  et  $f(u) \sim u^\zeta$  si  $u \gg c$ , où  $\zeta$  est la valeur maximale de l'exposant de rugosité de

Hurst dans la direction Z du front de fissure et où c est une constante reliée aux toposités  $l_x$  et  $l_z$ , lesquelles représentent les échelles respectives pour lesquelles  $\Delta h$  est égal à  $\Delta X$  et  $\Delta h$  est égal à  $\Delta Z$ , Z représentant la direction du front, direction orthogonale à la direction X, et

5  $\kappa$  est la valeur d'un troisième exposant défini par  $\kappa = \zeta/\beta$ .

En effet, la Demanderesse a vérifié que cette évolution de référence de la fonction de corrélation exposée en (5) met en jeu les deux valeurs précitées  $\zeta$  et  $\beta$  de l'exposant de Hurst, respectivement dans les  
10 directions Z et X qui sont sensiblement égales à 0,75 et à 0,60, et également le troisième exposant  $\kappa$  qui est sensiblement égal à 1,25.

Conformément à ce second mode selon l'invention, pour un relevé topographique de type « 2D » à acquérir à l'étape a), on « soustrait de  
15 préférence le plan moyen de la surface de rupture afin d'assurer la planéité moyenne de cette surface. A partir des profils issus d'un relevé topographique « 1D » dans ladite pluralité de directions, on peut reconstituer une cartographie « 2D » à laquelle on « soustrait » de préférence le plan moyen.

Ensuite, on calcule l'évolution spatiale de la fonction de  
20 corrélation « 2D » des hauteurs définie par la relation (4) ci-dessus, puis on détermine les directions orthogonales Z et X, correspondant respectivement à la direction du front de la fissure et à la direction de propagation de ladite fissure, pour lesquelles la fonction de corrélation de la surface évolue conformément à la relation (5) ci-dessus, de préférence au moyen d'un  
25 programme informatique (une carte de 100 par 100 points au minimum est préférable).

Selon un exemple préférentiel de mise en œuvre du second mode de réalisation de l'invention, l'étape d) comprend les sous-étapes  
30 suivantes :

(i) on détermine les exposants  $H_z$  et  $H_x$  et les topothésies  $l_z$  et  $l_x$  correspondant aux exposants de Hurst et aux topothésies définis par la fonction de corrélation unidimensionnelle  $\Delta h/l = (\Delta r/l)^H$  respectivement selon la direction horizontale  $z$  et verticale  $x$  de la carte des hauteurs ;

5 (ii) on calcule la fonction de corrélation bidimensionnelle théorique  $\Delta h^{th}(\Delta z, \Delta x) = (\Delta x/l_x)^{H_x} f((\Delta z/l_z) / (\Delta x/l_x)^{H_x/H_z})$  avec  $f$  donnée par :

$f(u) = l_x$  si  $u < (l_x/l_z)^{1/H_z}$  et  $f(u) = u^{H_z}$  si  $u > (l_x/l_z)^{1/H_z}$  à partir des valeurs numériques de  $H_z$ ,  $H_x$ ,  $l_z$  et  $l_x$  calculées à l'étape (i) ;

10 (iii) on calcule à partir de la carte des hauteurs la fonction de corrélation bidimensionnelle expérimentale notée  $\Delta h^{exp}(\Delta z, \Delta x)$  ;

(iv) on définit la déviation  $err$  de la fonction théorique à la fonction expérimentale par :  $err = \langle | \Delta h^{exp}(\Delta z, \Delta x) - \Delta h^{th}(\Delta z, \Delta x) | \rangle$  où  $\langle \rangle$  représente la moyenne sur l'ensemble des valeurs prises par  $\Delta z$  et  $\Delta x$ , de telle sorte que  $err$  est un nombre positif ;

15 (v) on redéfinit la carte des hauteurs dans un repère issu d'une rotation d'un angle  $\theta$  à partir du repère initial, et on reproduit les étapes (i), (ii), (iii) et (iv). On calcule ainsi pour chaque valeur de  $\theta$  explorée la grandeur  $err$  ; et

20 (vi) on cherche le minimum de la fonction  $err(\theta)$  sur  $\theta$  variant de 0 à 180°. Celle-ci présente 2 minima correspondant respectivement à  $\theta_1$  et  $\theta_2$ . Parmi ces deux valeurs, celle pour laquelle  $H_z$  mesuré à l'étape (i) est minimum correspond à la direction de propagation  $X$  et celle des deux pour laquelle  $H_z$  est maximal est la direction du front de fissure, perpendiculaire à cette direction de propagation  $X$ .

25

Un système selon l'invention pour la mise en œuvre du procédé susmentionné de détermination de parcours de fissure comporte :

- au moins un profilomètre adapté pour acquérir, selon une pluralité de directions, soit des profils de hauteur dans le cas (i), soit une carte des hauteurs dans le cas (ii), d'au moins une surface de rupture suivant laquelle a été cassée une structure solide,

30

- des premiers moyens de traitement statistique desdits profils de hauteur pour déterminer, pour lesdites directions, des propriétés de rugosité anisotropes de ladite surface qui sont représentatives de l'évolution spatiale d'une fonction de corrélation desdits profils et qui comprennent  
5 différentes valeurs de l'exposant de Hurst de ladite surface, et

- des seconds moyens de traitement statistique de ladite carte, pour comparer les propriétés de sa fonction de corrélation des hauteurs aux propriétés d'une fonction de référence  $\Delta h$  qui sont spécifiques à la direction X de propagation d'au moins une fissure à l'origine de ladite ou  
10 chaque surface, et adaptés pour déterminer lesdites directions X pour lesquelles la ou les propriété(s) ou l'évolution correspondante de la fonction de corrélation est similaire à la ou aux propriété(s) ou à l'évolution de ladite fonction de référence  $\Delta h$  et pour lesquelles l'exposant de Hurst de ladite surface présente une valeur minimale  $\beta$  en comparaison de celle relative aux  
15 autres directions.

Les domaines d'applications dudit procédé et dudit système selon l'invention comprennent, à titre nullement limitatif, les structures utilisées dans les transports (e.g. le domaine aéronautique par exemple pour des  
20 hélices d'avion, des ailes ou des turbines d'aéronefs, la navigation fluviale ou maritime, les transports ferroviaires ou automobiles, etc.), les ouvrages de génie civil (e.g. les ponts, les bâtiments, etc), les composants utilisés dans les nouvelles technologies (e.g. les nanostructures et nanocéramiques utilisées en électronique, les quasi-cristaux utilisés dans les revêtements, etc.) les  
25 objets artisanaux (e.g. en marbre), les structures terrestres par exemple étudiées en tectonique ou dans l'industrie pétrolière, les constructions décoratives ou de protection par exemple en verre (e.g. dans l'industrie nucléaire), etc.

On comprendra que la détermination des causes de rupture  
30 d'une structure qui est rendue possible par le procédé selon la présente invention peut avantageusement permettre, le cas échéant, de déterminer la part de responsabilité de chacun vis-à-vis des compagnies d'assurances. La

connaissance des causes de rupture et du ou des chemins suivis par la ou les fissures responsables de la rupture de la structure peut par ailleurs permettre d'en modifier la conception, de manière à améliorer la tenue mécanique des structures similaires dans le futur.

5

Les caractéristiques précitées de la présente invention, ainsi que d'autres, seront mieux comprises à la lecture de la description suivante de plusieurs exemples de réalisation de l'invention, donnés à titre illustratif et non limitatif, ladite description étant réalisée en relation avec les dessins joints, parmi lesquels :

10

la figure 1 est une image topographique acquise pour une surface de rupture d'une structure en verre de silice, suivant les axes X et Z des directions de propagation et du front de la fissure, respectivement,

15

la figure 2 est une image topographique acquise pour une surface de rupture d'une structure en alliage d'aluminium, suivant les mêmes axes,

la figure 3 est une image topographique acquise pour une surface de rupture d'une structure en mortier, suivant les mêmes axes,

20

la figure 4 est une image topographique acquise pour une surface de rupture d'une structure en bois, suivant les mêmes axes,

la figure 5 est un graphique illustrant, pour une surface de rupture en un alliage d'aluminium, les deux évolutions distinctes de la fonction de corrélation « 1D » des hauteurs respectivement mesurées parallèlement à la direction de propagation de la fissure et parallèlement au front de fissure,

25

la figure 6 est une représentation en trois dimensions de la fonction de corrélation des hauteurs pour une surface de rupture en un alliage d'aluminium,  $\Delta h$  étant normalisé par  $\Delta X^\beta$ ,

30

la figure 7 est une représentation en deux dimensions, dans le plan  $(\Delta Z, \Delta X)$ , de domaines situant les deux différents types d'évolution de la fonction de corrélation des hauteurs illustrée à la figure 6,

la figure 8 est un graphique illustrant les variations selon  $\Delta Z$ , pour différentes valeurs de  $\Delta X$ , de la fonction de corrélation « 2D » normalisée par  $\Delta X^\beta$  relative à la surface de rupture en verre de silice illustrée à la figure 1,

la figure 9 est un graphique illustrant les variations selon  $\Delta Z$ , pour différentes valeurs de  $\Delta X$ , de la fonction de corrélation « 2D » normalisée par  $\Delta X^\beta$  pour la surface de rupture en alliage d'aluminium illustrée à la figure 2,

la figure 10 est un graphique illustrant les variations selon  $\Delta Z$ , pour différentes valeurs de  $\Delta X$ , de la fonction de corrélation « 2D » normalisée par  $\Delta X^\beta$  pour la surface de rupture en mortier illustrée à la figure 3, et

la figure 11 est un graphique illustrant les variations selon  $\Delta Z$ , pour différentes valeurs de  $\Delta X$ , de la fonction de corrélation « 2D » normalisée par  $\Delta X^\beta$  pour la surface de rupture en bois illustrée à la figure 4.

Le compte rendu expérimental qui suit a visé à mettre en évidence des propriétés statistiques anisotropes de rugosité relatives à des surfaces de rupture de quatre matériaux différents, qui présentent respectivement différentes tailles caractéristiques de microstructure : du verre de silice à titre de matériau de type fragile, un alliage d'aluminium à titre de matériau ductile, ainsi que du mortier et du bois à titre de matériaux quasi-fragiles (respectivement isotropes et anisotropes).

On a cassé ces quatre matériaux respectivement par des tests mécaniques de rupture différents, puis l'on a acquis des relevés topographiques des surfaces de rupture via trois techniques différentes.

### **Description des tests de cassure et des méthodes d'acquisition de la topographie des surfaces de rupture :**

1) On a obtenu les surfaces de rupture d'une structure en verre de silice, telles que celle illustrée à la figure 1, par rupture d'échantillons parallélépipédiques de dimensions  $5 \times 5 \times 25 \text{ mm}^3$  sous « DCDC » (i.e.

« Double Cleavage Drilled Compression ou essai de fendage double en compression entraînant l'ouverture), à partir d'un trou percé dans l'échantillon, deux fissures symétriques se propageant par corrosion sous contrainte. On se reportera, pour une description complète de ce mode de rupture, à l'article  
5 Prades, S., D. Bonamy, D. Dalmas, E. Bouchaud, et E. Guillot: 2004, Nano-ductile crack propagation in glasses under stress corrosion: spatiotemporal evolution of damage in the vicinity of the crack tip. Int. J. Solids Struct. 42, 637–645.

Après un régime initial où la propagation est dynamique, la  
10 fissure s'est propagée à faible vitesse en corrosion sous contrainte. On a mesuré cette vitesse en imageant en temps réel la propagation par microscopie à force atomique (« AFM » en anglais). Dans le régime en corrosion sous contrainte, on a contrôlé la vitesse de propagation de la fissure en ajustant cette charge de compression. Le protocole est alors le suivant :

- 15 (i) on a appliqué une charge importante afin d'atteindre une importante vitesse de fissuration ;
- (ii) on a diminué la charge en dessous de la valeur initialement souhaitée ; puis
- (iii) on a augmenté de nouveau la charge pour atteindre la  
20 valeur correspondant à la vitesse souhaitée, et on l'a ensuite maintenue constante.

Cette procédure a permis d'observer sur les surfaces de rupture *post-mortem* des zones correspondant à des vitesses constantes clairement séparées par des lignes d'arrêt. On a alors procédé à des relevés  
25 topographiques des surfaces de rupture par « AFM », avec une résolution latérale et verticale de respectivement 5 nm et 0,1 nm. Pour s'assurer qu'il n'y avait pas de biais lié à la direction de balayage de la pointe « AFM », on a enregistré chaque image dans deux directions perpendiculaires et les analyses présentées ci-dessous ont été faites sur les deux jeux d'images. Les  
30 images sont constituées de 1024 x 1024 pixels et représentent un carré de 1 µm de côté.



2) On a obtenu les surfaces de rupture d'une structure en alliage d'aluminium commercial « 7475 », telles que celle illustrée à la figure 2, à l'aide d'échantillons « CT » (i.e. à tension compacte), tout d'abord pré-fissurés par fatigue et ensuite cassés en leur appliquant en tension une charge uniaxiale.

On a observé les surfaces de rupture dans ce deuxième régime par microscopie électronique à balayage (MEB) à deux angles d'inclinaison différents. On a généré des cartes topographiques de haute précision à partir des paires stéréoscopiques, en utilisant une technique de reconstruction basée sur l'inter-corrélation des deux images. On se reportera pour plus de précisions à l'article de Amman, J. J. et E. Bouchaud: 1998, Characterization of self affine surfaces from 3D digital reconstruction. Eur. Phys. J. AP 4, 133–142. La carte ainsi reconstruite représente un rectangle de  $565 \times 405 \mu\text{m}^2$  et est constituée de  $512 \times 512$  pixels. La résolution hors et dans le plan de rupture est de l'ordre de 2 à 3  $\mu\text{m}$ .

3) On a obtenu les surfaces de rupture d'une structure en mortier, telles que celle illustrée à la figure 3, par des tests de flexion quatre points entraînant une rupture en tension. On a contrôlé le déplacement pendant le test. La longueur de la poutre était de 1400 mm et sa hauteur de 140 mm.

On a enregistré la topographie de la surface de rupture en utilisant un profilomètre optique. Les cartes étaient constituées de 500 profils de 4096 points chacun, le premier profil étant proche de l'entaille initiale. Le pas d'acquisition le long des profils était de 20  $\mu\text{m}$ . Deux profils successifs étaient séparés de 50  $\mu\text{m}$  le long de la direction de propagation de la fissure. La précision verticale et latérale était de l'ordre de 5  $\mu\text{m}$ .

Par analyse *post-mortem* des surfaces de rupture, on a observé un régime transitoire. Sur les 10 premiers millimètres parcourus par la fissure correspondant aux 200 premiers profils, la rugosité augmentait avec la distance à l'entaille initiale. On se reportera à l'article de Mourot, G., S. Morel, E. Bouchaud, et G. Valentin: 2005, Anomalous scaling of mortar

fracture surfaces. Phys. Rev. E 71, 016136–1–016136–7 pour une description complète des propriétés statistiques de la rugosité dans cette zone.

On s'est intéressé ici à la morphologie de cette surface en mortier dans une zone éloignée de l'initiation de la rupture, et l'on a systématiquement supprimé les 200 premiers profils des cartes étudiées.

4) On a obtenu les surfaces de rupture d'une structure en bois, telles que celle illustrée à la figure 4, à partir d'éprouvettes « TDCB » modifiées (i.e. « Tapered Double Cantilever Beams » ou poutres cantilever doubles coniques) soumises à une tension uniaxiale avec une vitesse de déplacement maintenue constante. On se reportera pour plus de détails à l'article Morel, S., G. Mourot, et J. Schmittbuhl: 2003, Influence of the specimen geometry on R-curve behavior and roughening of fracture surfaces. Int. J. Frac. 121, 23–42. Le matériau étudié était un bois « Spruce » (i.e. *Picea* 15 *exce/sa*) qui est fortement anisotrope.

On a ainsi obtenu une rupture en tension de l'échantillon. La fissure s'est propagée le long de la direction longitudinale du bois. Par conséquent, les longueurs caractéristiques observées sur les surfaces de rupture étaient fortement anisotropes, étant respectivement de l'ordre de quelques mm et de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  dans les directions longitudinale et transverse. Ces valeurs correspondaient respectivement à la longueur et au diamètre des cellules du bois.

Pour s'adapter à ces échelles, on a topographié les surfaces de rupture via un profilomètre optique sur une surface de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  avec une meilleure résolution dans la direction transverse ( $25 \mu\text{m}$ ) que dans la direction longitudinale ( $2,5 \text{ mm}$ ). La carte topographique obtenue contenait 50 profils parallèles à la direction du front de fissure contenant 2048 points chacun. Comme pour les surfaces de rupture du mortier, on a établi la topographie loin de la pré-fissure initiale, i.e. à environ 50 mm de celle-ci, de sorte que la rugosité était statistiquement stationnaire dans la zone étudiée.

**Images topographiques acquises**  
**pour ces quatre matériaux :**

5 Pour plus de clarté, les surfaces de rupture respectivement illustrées aux figures 1 à 4 correspondent à des zones carrées. L'axe Z et l'axe X représentent respectivement la direction du front de fissure et celle de propagation de celle-ci.

10 Dans les quatre cas, les axes du repère sont ( $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$ ), de telle sorte que  $e_x$  et  $e_z$  soient respectivement selon la direction de propagation et celle du front de fissure. La hauteur  $h$  du relief en un point donné est alors mesurée suivant l'axe  $e_y$ .

15 On notera que les surfaces ainsi topographiées sont visuellement bien différentes les unes des autres : les longueurs caractéristiques des reliefs dans le plan de rupture (le long des axes X et Z) et hors de ce plan (le long de la hauteur  $h$ ) dépendent étroitement du matériau considéré. Ces longueurs sont respectivement de l'ordre de 50 nm et 1 nm pour le verre de silice, approximativement de l'ordre de 100  $\mu$ m et 30  $\mu$ m pour l'alliage d'aluminium, et de l'ordre de 5 et 0,6 mm pour le mortier.

20 La surface de rupture du bois est très anisotrope : dans le plan de rupture, les reliefs sont de l'ordre de 50 et 1 mm respectivement le long des directions longitudinale (axe X) et transverse (axe Z), et de l'ordre de 200  $\mu$ m hors du plan de rupture.

25 **Analyse « 1D » de la fonction de corrélation des hauteurs:**

Afin d'étudier l'anisotropie de ces surfaces de rupture, on a calculé pour chaque matériau la fonction de corrélation « 1D » des hauteurs :

$$\Delta h(\Delta Z) = \langle (h(Z+\Delta Z, X) - h(Z, X))^2 \rangle^{1/2} \text{ dans la direction Z et}$$

$$30 \quad \Delta h(\Delta X) = \langle (h(Z, X+\Delta X) - h(Z, X))^2 \rangle^{1/2} \text{ dans la direction X.}$$

On a représenté l'évolution de ces fonctions à la figure 5, pour une surface de rupture d'un échantillon en alliage d'aluminium.

Les courbes de la figure 5 indiquent clairement une dépendance des propriétés statistiques de la surface avec la direction des profils étudiés, bien que ceux-ci soient auto-affines à la fois dans la direction de propagation (axe X) et dans celle du front de fissure (axe Z). Cette anisotropie est présente non seulement sur la longueur de corrélation et l'amplitude de la rugosité, mais aussi sur la valeur de l'exposant de Hurst qui est la pente de la courbe.

Les droites représentées à la figure 5 correspondent aux lois de puissance se rapprochant le plus des points expérimentaux. Les pentes de ces droites, i.e. les exposants des lois de puissance, sont précisées ci-après.

Le long du front de fissure, on a trouvé pour cet exposant de Hurst une valeur  $\zeta = 0,75 \pm 0,03$ , i.e. sensiblement en accord avec la valeur « universelle » de l'exposant de rugosité  $H = 0,8$  rapportée dans la littérature, comme indiqué ci-dessus en référence à l'état antérieur de la technique.

Parallèlement à la direction de propagation, on a trouvé pour cet exposant de Hurst une valeur  $\beta = 0,58 \pm 0,03$ , i.e. significativement plus réduite que la valeur  $\zeta$  obtenue dans la direction perpendiculaire.

En conclusion, il est possible de déterminer la direction X de propagation de la fissure qui se traduit par une valeur minimale de l'exposant de Hurst (sensiblement égale à 0,60).

### **Analyse « 2D » de la fonction de corrélation des hauteurs:**

L'existence de deux lois de puissance bien distinctes respectivement dans deux directions différentes de la surface de rupture en alliage d'aluminium précitée (cf. figure 5), a conduit la Demanderesse à une analyse « 2D » de la fonction de corrélation des hauteurs définie selon la relation (4) ci-dessus :

$$\Delta h(\Delta Z, \Delta X) = \langle [h(Z+\Delta Z, X+\Delta X) - h(Z, X)]^2 \rangle_{z,x}^{1/2}$$

La figure 6 donne une représentation de  $\Delta h$  dans le plan  $(\Delta Z, \Delta X)$  en échelle de couleurs pour cet alliage d'aluminium. On a normalisé la

fonction  $\Delta h$  par  $\Delta X^\beta$ , et les axes sont en échelle logarithmique afin de mettre en valeur l'anisotropie des lois de puissance de cette fonction  $\Delta h$ .

La figure 7, dérivée de la figure 6, fait clairement apparaître deux comportements distincts de la fonction de corrélation « 2D », selon l'orientation du vecteur **AB** de coordonnées  $(\Delta Z, \Delta X)$ . La zone grisée correspond à une évolution de la fonction de corrélation comme  $\Delta h \sim \Delta X^\beta$ , cette fonction contenant des informations sur les propriétés statistiques de la morphologie de la surface de rupture dans toutes les directions.

Plus précisément, si le vecteur **AB** est présent dans la région grisée de la figure 7 – qui correspond à la région centrale foncée de la figure 6), alors la fonction de corrélation « 2D » suit la loi d'évolution  $\Delta h \sim \Delta X^\beta$  et ne dépend pas de  $\Delta Z$ . Dans cette échelle logarithmique, les limites de ce domaine sont des droites. Ceci indique que la largeur  $\xi$  (cf. figure 7) de ce domaine augmente en loi de puissance :  $\xi \sim \Delta X^{1/\kappa}$ , où  $\kappa \approx 1,26$ .

Autrement dit, à partir d'un point A de la surface de rupture, se développe un domaine où la fonction de corrélation « 2D » varie comme  $\Delta X^\beta$  d'une largeur  $\Delta Z = \xi$  qui augmente comme  $\Delta X^{1/\kappa}$  (la fissure se propageant parallèlement à l'axe des X).

Hors de ce domaine, la fonction de corrélation « 2D » dépend à la fois de  $\Delta X$  et de  $\Delta Z$ . Si  $\Delta X=0$ , la fonction de corrélation correspond à celle représentée à la figure 5 et varie comme  $\Delta h \sim \Delta Z^\zeta$  avec  $\zeta = 0,75$ . Cette variation n'est pas visible sur la figure 6 à cause de la divergence du terme de normalisation  $\Delta X^\beta$ .

Par conséquent, la Demanderesse a établi que l'on peut rendre compte d'un tel comportement de la fonction de corrélation « 2D » de la surface de fracture comme indiqué par l'équation (5) précitée :

$$\Delta h(\Delta Z, \Delta X) = \Delta X^\beta f(\Delta Z / \Delta X^{1/\kappa}) \quad (5)$$

$$\text{où } f(u) \sim 1 \text{ si } u \ll c \text{ et } f(u) \sim u^\zeta \text{ si } u \gg c$$

où la constante  $c$  est reliée aux topothésies  $l_x$  et  $l_z$  définies respectivement le long de X et de Z.

Les figures 8 à 11 illustrent respectivement, pour les quatre matériaux précités, les variations selon  $\Delta Z$  pour différentes valeurs de  $\Delta X$  de la fonction de corrélation « 2D » normalisée  $\Delta h_{\Delta x}$ .

Les graphiques de ces figures 8 à 11 démontrent que la fonction de corrélation de chacune des quatre surfaces étudiées est représentée par l'équation (5) ci-dessus. En effet, pour des valeurs adéquates de  $\beta$  et de  $\kappa$ , on peut voir sur chaque graphique principal qu'en normalisant l'axe des abscisses par  $\Delta X^{1/\kappa}$  et l'axe des ordonnées par  $\Delta X^\beta$ , toutes les courbes se réduisent à une seule courbe maîtresse. Comme le prévoit l'équation (5) ci-dessus, cette courbe maîtresse est caractérisée par un plateau et elle est suivie par une variation en loi de puissance avec un exposant  $\zeta$ . Les exposants  $\beta$  et  $\kappa$  sont déterminés en optimisant le recouvrement des courbes alors que l'exposant  $\zeta$  est déterminé comme étant l'exposant de la loi de puissance qui correspond le mieux aux variations aux grandes échelles de la courbe maîtresse.

Ces trois exposants déterminés indépendamment sont données dans le tableau 1 ci-après pour chacun de ces quatre matériaux. Ces exposants  $\zeta$ ,  $\beta$ ,  $\kappa$  sont respectivement assimilables à un exposant de rugosité, un exposant de croissance et un exposant dynamique  $\kappa$ . La quatrième colonne de ce tableau est le rapport de  $\zeta$  sur  $\beta$ . Les barres d'erreur correspondent à un intervalle de confiance de 95 %.

Tableau 1 :

	$\zeta$	$\beta$	$\kappa$	$\zeta/\beta$
Verre de silice	$0,77 \pm 0,03$	$0,61 \pm 0,04$	$1,30 \pm 0,15$	1,26
Alliage d'aluminium	$0,75 \pm 0,03$	$0,58 \pm 0,03$	$1,26 \pm 0,07$	1,29
Mortier	$0,71 \pm 0,06$	$0,59 \pm 0,06$	$1,18 \pm 0,15$	1,20
Bois	$0,79 \pm 0,05$	$0,58 \pm 0,05$	$1,25 \pm 0,15$	1,36

On a donc établi que les trois exposants précités sont  $\zeta \approx 0,75$ ,  $\beta \approx 0,60$  et  $\kappa \approx 1,25$ , indépendamment du matériau et de la vitesse de propagation de la fissure - du régime très basse vitesse en corrosion sous contrainte (picomètre par seconde) au régime dynamique (kilomètre par seconde). On notera que l'exposant  $\kappa$  vérifie la relation  $\kappa = \beta/\zeta$ .

En conclusion, il est possible de déterminer la direction X de propagation de la fissure qui se traduit par le fait que la fonction de corrélation « 2D » de la surface de rupture considérée suit la loi d'évolution de l'équation (5) ci-dessus, avec les valeurs précitées des trois exposants  $\zeta$ ,  $\beta$  et  $\kappa$ .

## REVENDEICATIONS

1. Procédé de détermination, dans une structure solide, de tout ou partie du parcours de propagation d'au moins une fissure ayant cassé ladite structure solide suivant une ou plusieurs surfaces de rupture, ledit procédé comprenant une étape a) d'acquisition de données topographiques de ladite ou chaque surface, soit dans un cas (i) par extraction de profils de hauteurs selon une pluralité de directions, soit dans un cas (ii) par acquisition d'une carte des hauteurs, et dans les deux cas avec une résolution pour laquelle ladite structure est hétérogène et rugueuse, caractérisé en ce qu'il comprend, à partir de cette étape a), une analyse des propriétés statistiques de rugosité de la ou de chaque surface qui témoigne d'une anisotropie de ces propriétés selon ladite pluralité de directions, pour déduire de cette anisotropie au moins une direction de propagation X de la ou chaque fissure qui définit tout ou partie dudit parcours et pour laquelle l'exposant de Hurst de ladite surface présente une valeur minimale  $\beta$  en comparaison de celle relative aux autres directions de ladite pluralité de directions.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes, suite à l'étape a) :

b) détermination :

- soit pour lesdites directions dans le cas (i), d'au moins une propriété statistique de rugosité de ladite surface qui est représentative de l'évolution spatiale d'une fonction de corrélation des profils extraits en a) et qui comprend des valeurs de l'exposant de Hurst de ladite surface correspondant respectivement auxdites directions,

- soit pour ladite carte dans le cas (ii), d'au moins une propriété statistique de rugosité de ladite surface qui est représentative de l'évolution spatiale de sa fonction de corrélation,

c) comparaison de la ou des propriétés déterminées en b) à des valeurs de référence de celle(s)-ci, lesquelles sont représentatives d'une



évolution spatiale de référence  $\Delta h$  de ladite fonction de corrélation qui est spécifique à des directions X de propagation de fissures, puis

- d) détermination de la ou des directions de propagation X, pour lesquelles cette comparaison témoigne d'une similarité entre propriété(s) visée(s) en b) et c) ou entre évolutions des fonctions correspondantes, et qui définissent tout ou partie dudit parcours de propagation.

3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que les fonctions de corrélation visées en b) et c) sont chacune à une dimension.

4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'exposant de Hurst présente une valeur  $\beta$  sensiblement égale à 0,60 dans lesdites directions X de propagation de ladite ou chaque fissure.

5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que l'exposant de Hurst présente une valeur  $\zeta$  sensiblement égale à 0,75 dans des directions Z qui correspondent au front de ladite ou chaque fissure et qui sont orthogonales auxdites directions X de propagation.

6. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que les fonctions de corrélation visées en b) et c) sont chacune à deux dimensions et sont calculées à partir de ladite carte des hauteurs dans le cas (ii), et en ce que les directions X déterminées en d) sont celles pour lesquelles l'évolution spatiale de la fonction de corrélation est de la forme :

$$\Delta h(\Delta Z, \Delta X) = \Delta X^\beta f(\Delta Z / \Delta X^{1/\kappa}) \quad \text{où :}$$

$\Delta Z$  et  $\Delta X$  correspondent à des incréments dans les directions orthogonales Z et X correspondant respectivement aux directions du front de ladite ou chaque fissure et aux directions de propagation de celle-ci,

$\beta$  est la valeur minimale de l'exposant de Hurst dans lesdites directions X de propagation de la ou chaque fissure,

f est une fonction de  $\Delta Z$  et  $\Delta X$  satisfaisant à  $f(u) \sim 1$  si  $u \ll c$  et  $f(u) \sim u^\zeta$  si  $u \gg c$ , où  $\zeta$  est la valeur maximale de l'exposant de rugosité de Hurst dans la direction Z du front de fissure et où c est une constante reliée aux topothésies  $l_x$  et  $l_z$ , lesquelles représentent les échelles respectives pour lesquelles  $\Delta h$  est égal à  $\Delta X$  et  $\Delta h$  est égal à  $\Delta Z$ , où Z représente la direction du front qui est orthogonale à la direction X, et où

$\kappa$  est la valeur d'un troisième exposant défini par  $\kappa = \zeta/\beta$ .

7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que l'exposant de Hurst présente des valeurs  $\zeta$  et  $\beta$  dans lesdites directions Z et X qui sont sensiblement égales à 0,75 et à 0,60, respectivement, l'exposant  $\kappa$  étant sensiblement égal à 1,25.

8. Procédé selon la revendication 6 ou 7, caractérisé en ce que l'étape d) comprend les sous-étapes suivantes, appliquées à ladite carte des hauteurs :

(i) on détermine les exposants  $H_z$  et  $H_x$  et les topothésies  $l_z$  et  $l_x$  correspondant aux exposants de Hurst et aux topothésies définis par la fonction de corrélation unidimensionnelle  $\Delta h/l = (\Delta r/l)^H$  respectivement selon la direction horizontale z et verticale x de la carte des hauteurs ;

(ii) on calcule la fonction de corrélation bidimensionnelle théorique  $\Delta h^{th}(\Delta z, \Delta x) = (\Delta x/l_x)^{H_x} f((\Delta z/l_z) / (\Delta x/l_x)^{H_x/H_z})$ , avec f donnée par

$f(u) = l_x$  si  $u < (l_x/l_z)^{1/H_z}$  et  $f(u) = u^{H_z}$  si  $u > (l_x/l_z)^{1/H_z}$  à partir des valeurs numériques de  $H_z$ ,  $H_x$ ,  $l_z$  et  $l_x$  calculées à l'étape (i) ;

(iii) on calcule à partir de la carte des hauteurs la fonction de corrélation bidimensionnelle expérimentale notée  $\Delta h^{exp}(\Delta z, \Delta x)$  ;

(iv) on définit la déviation err de la fonction théorique à la fonction expérimentale par :  $err = \langle | \Delta h^{exp}(\Delta z, \Delta x) - \Delta h^{th}(\Delta z, \Delta x) | \rangle$

où  $\langle \rangle$  représente la moyenne sur l'ensemble des valeurs prises par  $\Delta z$  et  $\Delta x$ , de telle sorte que err est un nombre positif ;

(v) on redéfinit la carte des hauteurs dans un repère issu d'une rotation d'un angle  $\theta$  à partir du repère initial et on reproduit les étapes (i), (ii), (iii) et (iv), de sorte à calculer la grandeur err pour chaque valeur de  $\theta$  explorée ; et

5 (vi) on cherche le minimum de la fonction  $err(\theta)$  sur  $\theta$  variant de 0 à 180°, laquelle présente 2 minima correspondant respectivement à  $\theta_1$  et  $\theta_2$  et, parmi ces deux valeurs, celle pour laquelle  $H_z$  mesuré à l'étape (i) est minimum correspond à la direction de propagation X et celle des deux pour laquelle  $H_z$  est maximal est la direction du front de fissure, perpendiculaire à  
10 cette direction de propagation X.

9. Procédé selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce que :

- dans le cas (i) de l'étape a), lesdits profils de hauteurs  
15 extraits en a) comprennent au moins 100 points de mesure pour chacune de ladite pluralité de directions qui comprend alors au moins 20 directions différentes, pour l'obtention d'une précision dans la détermination desdites directions X de propagation qui est inférieure ou égale à  $\pm 10$  degrés, et

- dans le cas (ii) de l'étape a), ladite carte des hauteurs  
20 extraite en a) comprend au moins 100 points par 100 points.

10. Procédé selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'étape a) d'acquisition de la topographie est mise en œuvre par une technique choisie dans le groupe constitué par la profilométrie  
25 mécanique, la profilométrie optique et la microscopie à champ proche.

11. Système pour la mise en œuvre du procédé selon une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte :

- au moins un profilomètre adapté pour acquérir, selon une  
30 pluralité de directions, soit des profils de hauteur dans ledit cas (i), soit une

carte des hauteurs dans ledit cas (ii), d'au moins une surface de rupture suivant laquelle a été cassée une structure solide,

- des premiers moyens de traitement statistique desdits profils de hauteur pour déterminer, pour lesdites directions, des propriétés de rugosité anisotropes de ladite surface qui sont représentatives de l'évolution spatiale d'une fonction de corrélation desdits profils et qui comprennent différentes valeurs de l'exposant de Hurst de ladite surface, et

- des seconds moyens de traitement statistique de ladite carte des hauteurs, pour comparer les propriétés de sa fonction de corrélation des hauteurs aux propriétés d'une fonction de référence  $\Delta h$  qui sont spécifiques à la direction X de propagation d'au moins une fissure à l'origine de ladite ou chaque surface, ces seconds moyens étant adaptés pour déterminer lesdites directions X pour lesquelles la ou les propriété(s) ou l'évolution correspondante de la fonction de corrélation est similaire à la ou aux propriété(s) ou à l'évolution de ladite fonction de référence  $\Delta h$  et pour lesquelles l'exposant de Hurst de ladite surface présente une valeur minimale  $\beta$  en comparaison de celle relative aux autres directions.

12. Système selon la revendication 11, caractérisé en ce que ledit profilomètre est choisi dans le groupe constitué par les profilomètres mécaniques, les profilomètres optiques et les microscopes à champ proche.

1/8

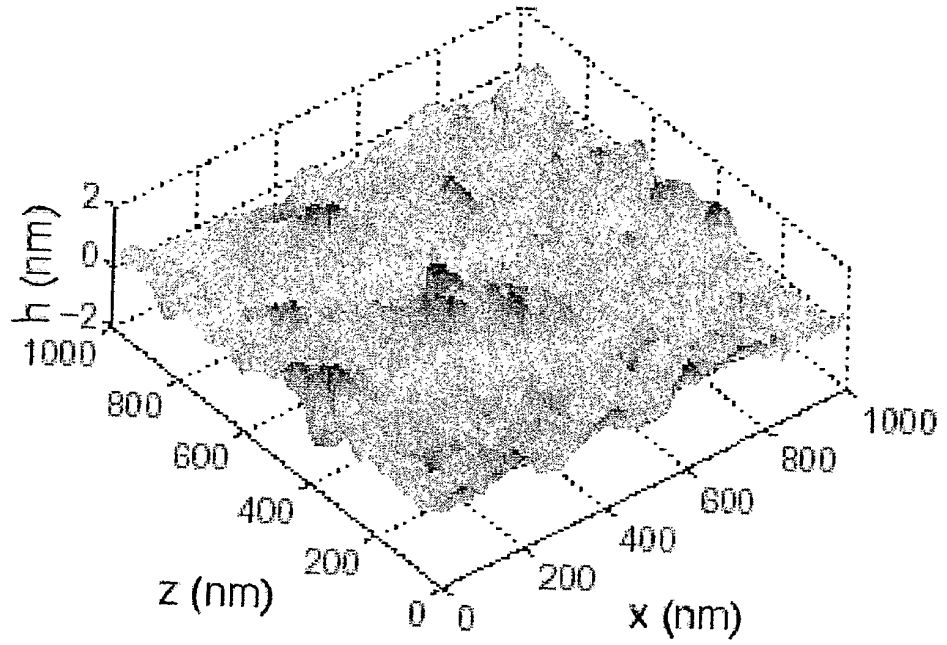


Figure 1

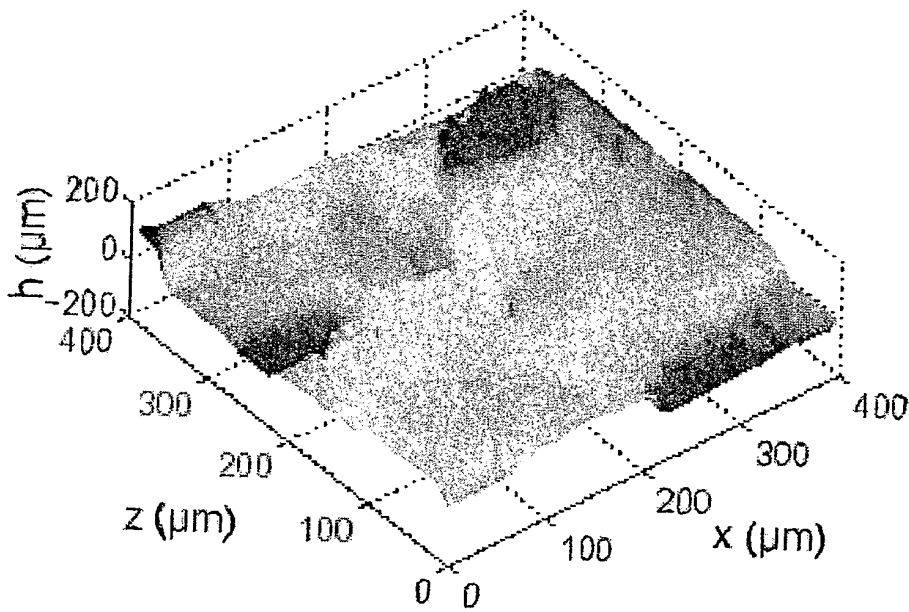


Figure 2

2/8

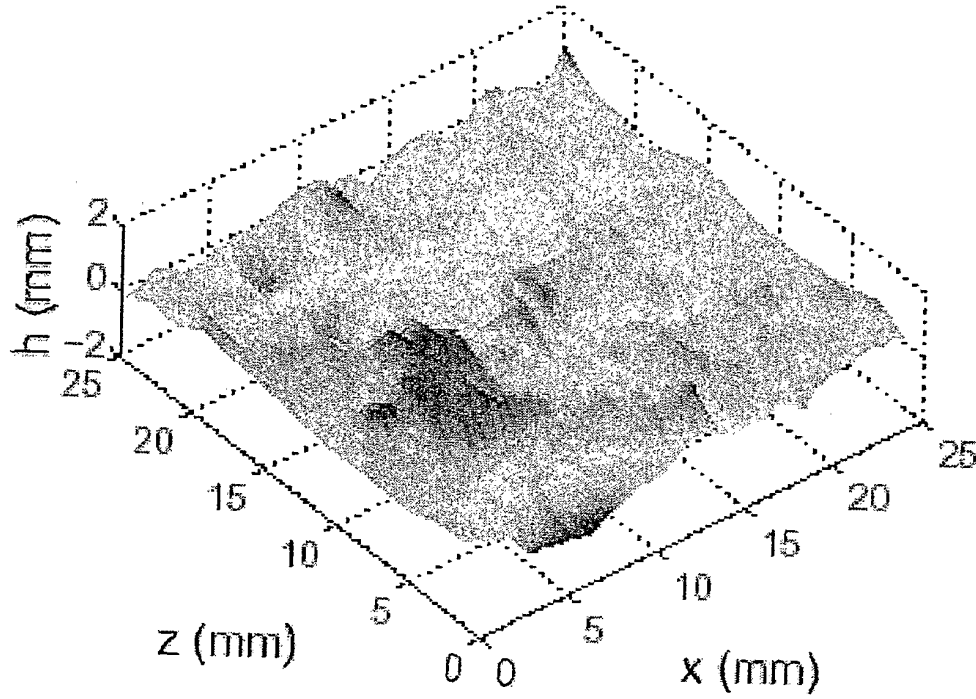


Figure 3

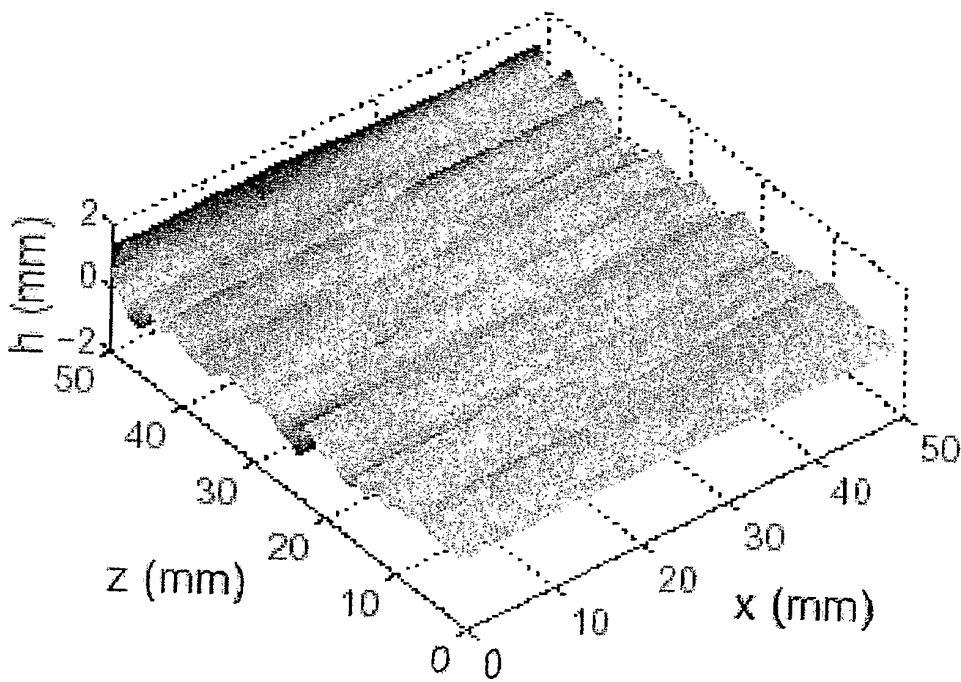


Figure 4

3/8

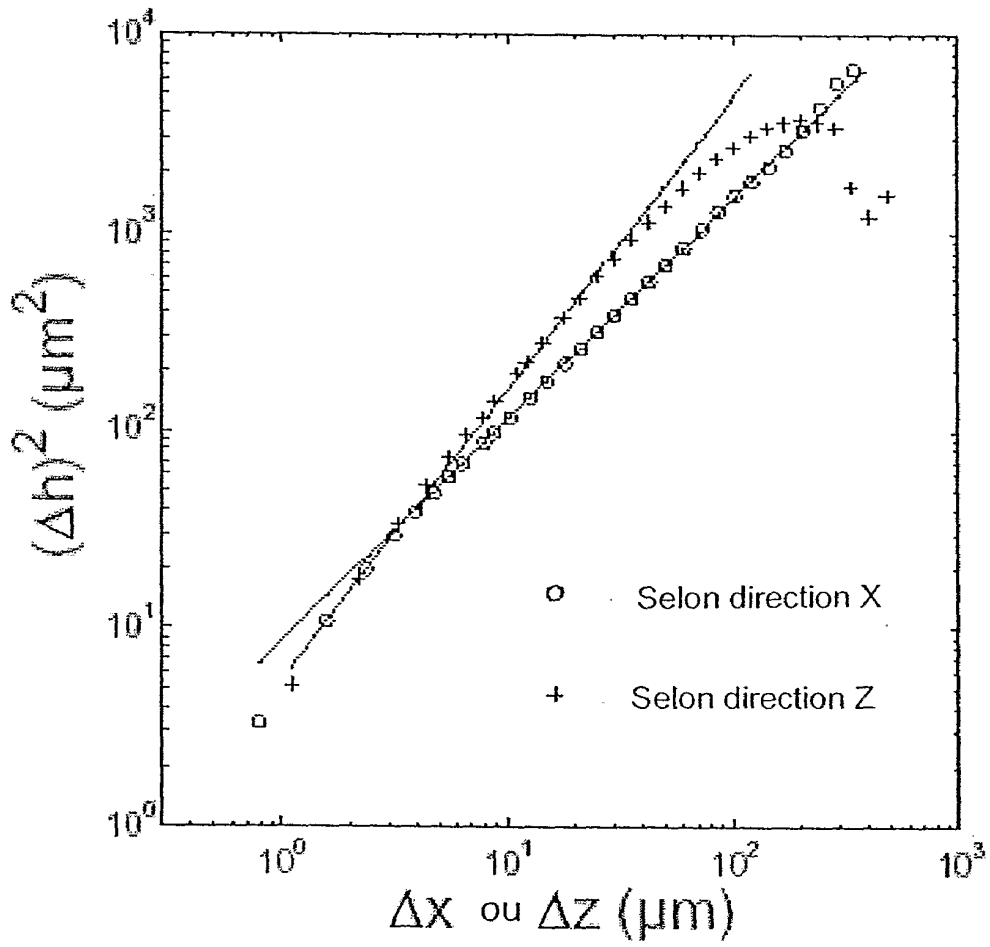


Figure 5

4/8

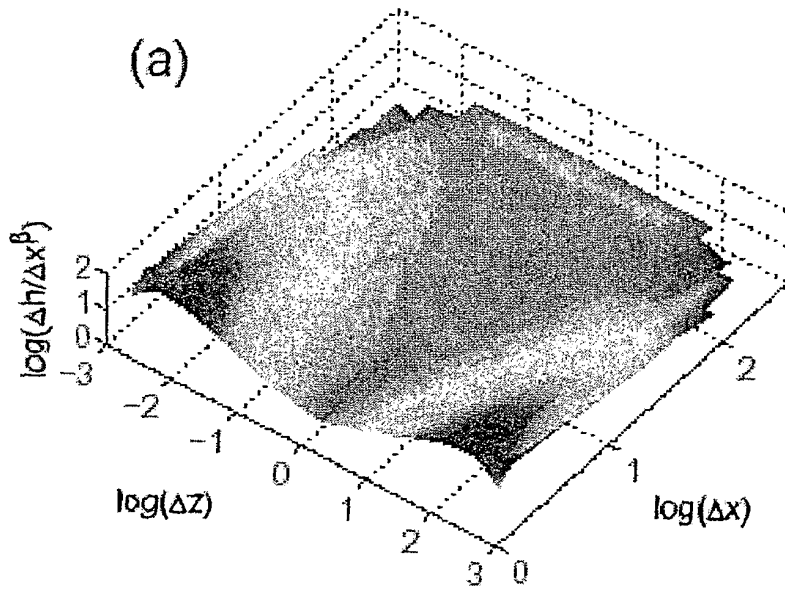


Figure 6

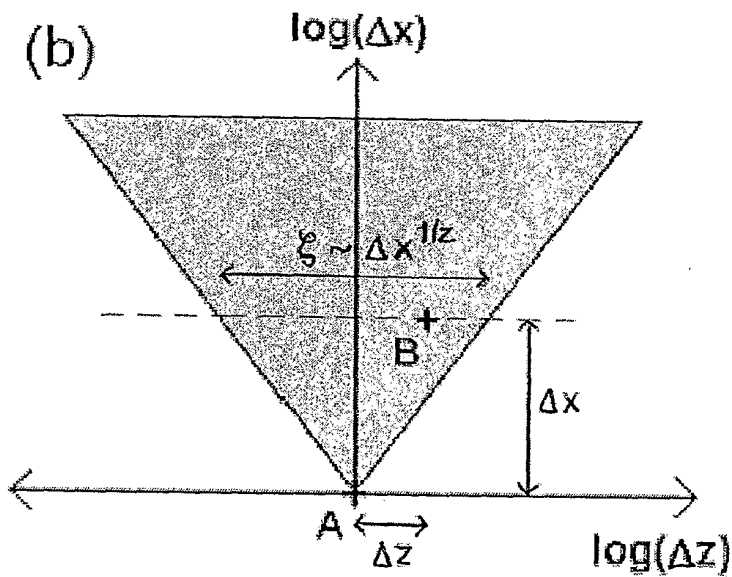


Figure 7



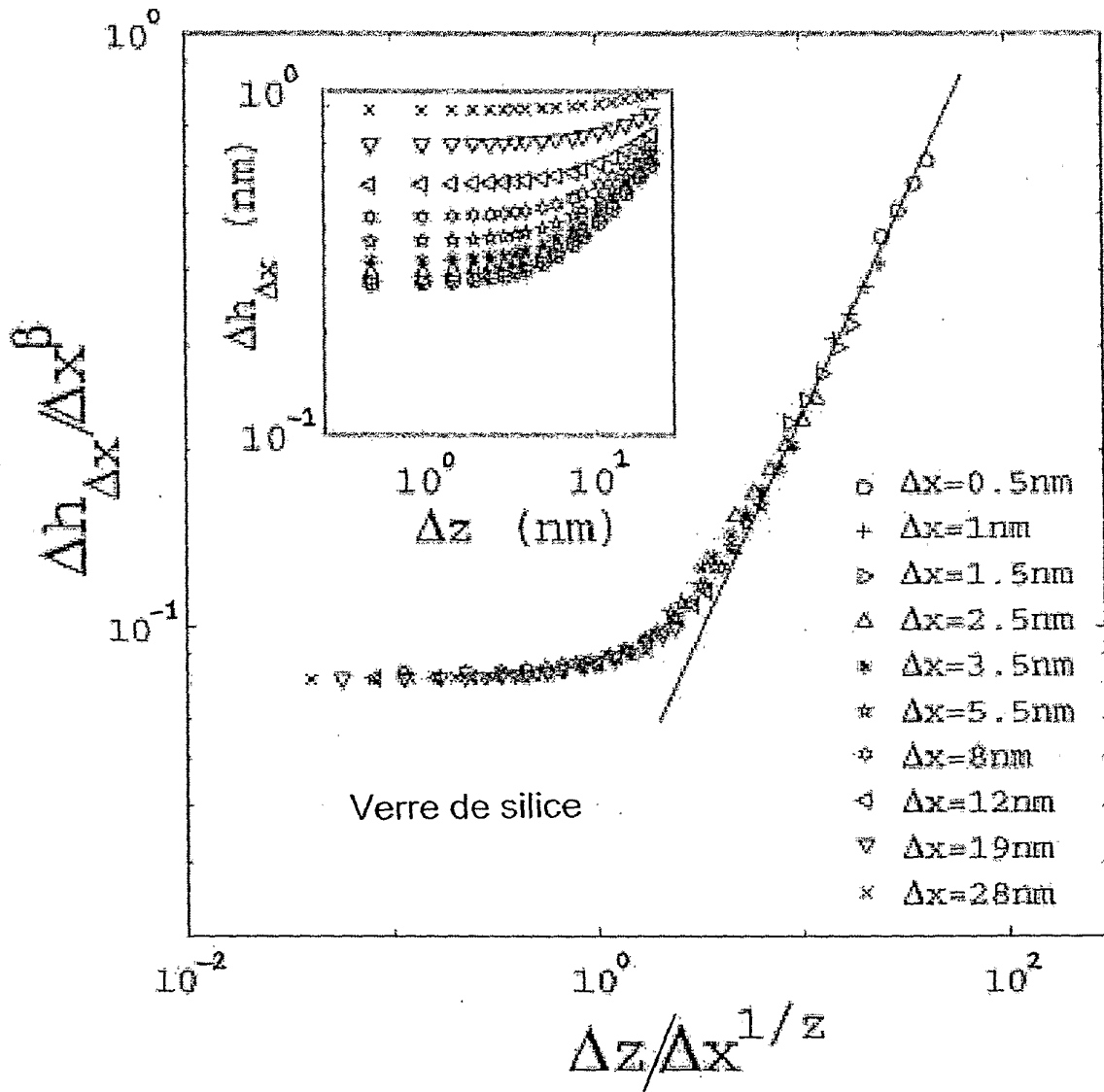


Figure 8

6/8

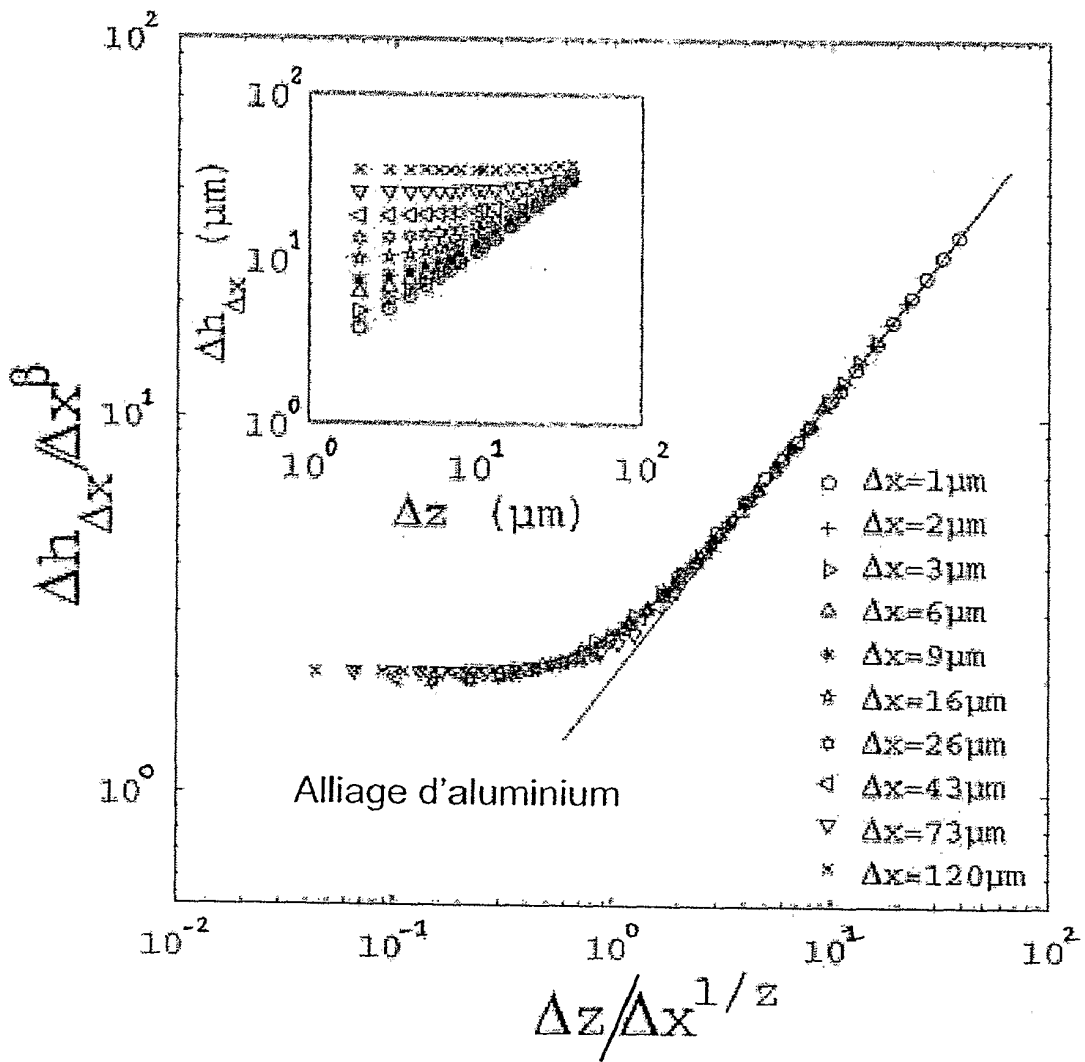


Figure 9

7/8

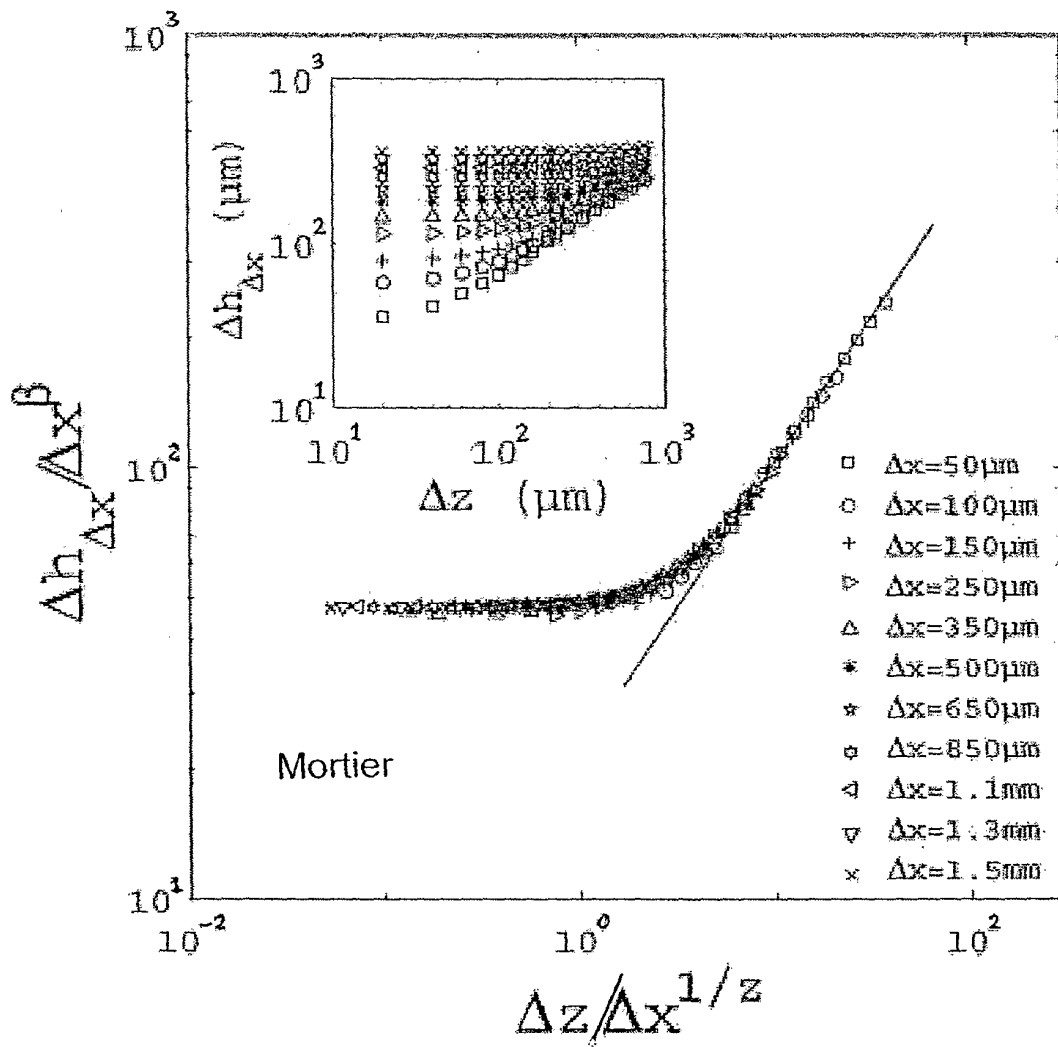


Figure 10

8/8

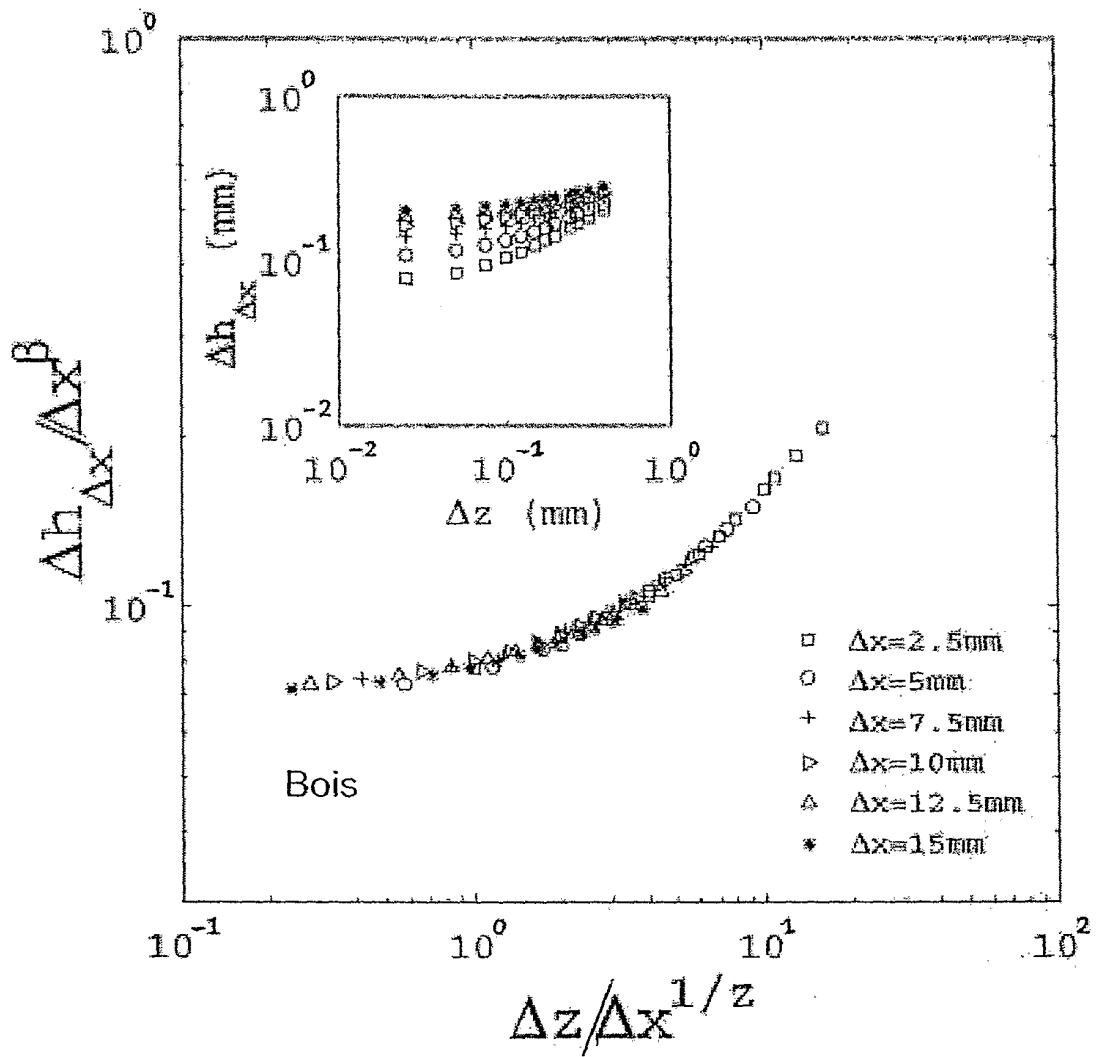


Figure 11

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No  
PCT/FR2006/002409

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
INV. G01N3/06

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 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, COMPENDEX

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; LAPIQUE FABRICE ET AL: "Self-affine fractal scaling in fracture surfaces generated in ethylene and propylene polymers and copolymers" XP009071127 Database accession no. E2002387092051	1-4, 11, 12
A	the whole document & J. APPL. POLYM. SCI.; JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE OCT 24 2002, vol. 86, no. 4, 24 October 2002 (2002-10-24), pages 973-983, ----- -/--	5-10

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier 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.
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

19 February 2007

Date of mailing of the international search report

02/03/2007

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

Weaver, Malika

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/FR2006/002409

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; BALANKIN ALEXANDER S ET AL: "Intrinsic nature of anomalous crack roughening in an anisotropic brittle composite" XP009071135 Database accession no. E2002256980519</p>	1
A	<p>the whole document &amp; PHILOS MAG LETT; PHILOSOPHICAL MAGAZINE LETTERS MARCH 2000, vol. 80, no. 3, March 2000 (2000-03), pages 165-172,</p>	2-12
X	<p>DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; ADDISON P S ET AL: "Fractal cracking of concrete: Parameterization of spatial diffusion" XP009071140 Database accession no. EIX99334708032</p>	1,2,11, 12
A	<p>the whole document &amp; J ENG MECH; JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS 1999 ASCE, RESTON, VA, USA, vol. 125, no. 6, 1999, pages 622-629,</p>	3-10
X	<p>DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; AMMANN J -J ET AL: "Characterization of self-affine surfaces from 3D digital reconstruction" XP009071139 Database accession no. EIX99114541141</p>	1,2,11, 12
A	<p>abstract page 135, paragraph 4 - page 142 &amp; EPJ APPL PHYS; EPJ APPLIED PHYSICS 1998 EDP SCI, LES ULIS CEDEX A, FRANCE, vol. 4, no. 2, 1998, pages 133-142,</p>	3-10
X	<p>DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; HANSEN ALEX ET AL: "Normal stress distribution of rough surfaces in contact" XP009071134 Database accession no. E2001075470414</p>	1,2,11, 12
	<p>the whole document &amp; GEOPHYS RES LETT; GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS NOV 2000 AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, WASHINGTON, DC, USA, vol. 27, no. 22, November 2000 (2000-11), pages 3639-3642,</p>	

-/--

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/FR2006/002409

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; SAITOU M ET AL: "Characterization of electrodeposited nickel film surfaces using atomic force microscopy" XP009071126 Database accession no. E2002277000723</p>	1,2,11, 12
A	<p>the whole document &amp; J PHYS CHEM SOLIDS; JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLIDS SEPTEMBER 2002, vol. 63, no. 9, September 2002 (2002-09), pages 1685-1689,</p>	3-10
A	<p>----- DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; HINOJOSA M ET AL: "Self-affinity analysis of glass fracture surfaces-natural fractals" XP009071142 Database accession no. E2001135536726 the whole document &amp; GLASS RES.; GLASS RESEARCHER 1999 ALFRED UNIVERSITY, vol. 9, no. 2, 1999, pages 23-24,</p>	1-12

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2006/002409

**A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE**  
 INV. GOIN3/06

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)

GOIN GOIB

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, 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	DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; LAPIQUE FABRICE ET AL: "Self-affine fractal scaling in fracture surfaces generated in ethylene and propylene polymers and copolymers" XP009071127 Database accession no. E2002387092051	1-4, 11, 12
A	le document en entier & J. APPL. POLYM. SCI.; JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE OCT 24 2002, vol. 86, no. 4, 24 octobre 2002 (2002-10-24), pages 973-983, ----- -/--	5-10

 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

"&amp;" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

19 février 2007

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

02/03/2007

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

Weaver, Malika



RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2006/002409

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	<p>DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; BALANKIN ALEXANDER S ET AL: "Intrinsic nature of anomalous crack roughening in an anisotropic brittle composite" XP009071135 Database accession no. E2002256980519</p>	1
A	<p>le document en entier &amp; PHILOS MAG LETT; PHILOSOPHICAL MAGAZINE LETTERS MARCH 2000, vol. 80, no. 3, mars 2000 (2000-03), pages 165-172,</p>	2-12
X	<p>DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; ADDISON P S ET AL: "Fractal cracking of concrete: Parameterization of spatial diffusion" XP009071140 Database accession no. EIX99334708032</p>	1,2,11, 12
A	<p>le document en entier &amp; J ENG MECH; JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS 1999 ASCE, RESTON, VA, USA, vol. 125, no. 6, 1999, pages 622-629,</p>	3-10
X	<p><del>DATABASE COMPENDEX [Online]</del> ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; AMMANN J -J ET AL: "Characterization of self-affine surfaces from 3D digital reconstruction" XP009071139 Database accession no. EIX99114541141</p>	1,2,11, 12
A	<p>abrégé page 135, alinéa 4 - page 142 &amp; EPJ APPL PHYS; EPJ APPLIED PHYSICS 1998 EDP SCI, LES ULIS CEDEX A, FRANCE, vol. 4, no. 2, 1998, pages 133-142,</p>	3-10
X	<p>DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; HANSEN ALEX ET AL: "Normal stress distribution of rough surfaces in contact" XP009071134 Database accession no. E2001075470414</p>	1,2,11, 12
	<p>le document en entier &amp; GEOPHYS RES LETT; GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS NOV 2000 AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, WASHINGTON, DC, USA, vol. 27, no. 22, novembre 2000 (2000-11), pages 3639-3642,</p>	

-/--

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2006/002409

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	<p>DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; SAITOU M ET AL: "Characterization of electrodeposited nickel film surfaces using atomic force microscopy" XP009071126 Database accession no. E2002277000723</p>	1,2,11, 12
A	<p>le document en entier &amp; J PHYS CHEM SOLIDS; JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLIDS SEPTEMBER 2002, vol. 63, no. 9, septembre 2002 (2002-09), pages 1685-1689,</p>	3-10
A	<p>----- DATABASE COMPENDEX [Online] ENGINEERING INFORMATION, INC., NEW YORK, NY, US; HINOJOSA M ET AL: "Self-affinity analysis of glass fracture surfaces-natural fractals" XP009071142 Database accession no. E2001135536726 le document en entier &amp; GLASS RES.; GLASS RESEARCHER 1999 ALFRED UNIVERSITY, vol. 9, no. 2, 1999, pages 23-24,</p> <p>-----</p>	1-12