



CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **719 203 A2**

(51) Int. Cl.: **B81C** 1/00 (2006.01)
G04B 31/08 (2006.01)
G04B 1/14 (2006.01)
G04B 15/14 (2006.01)

Demande de brevet pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(12) **DEMANDE DE BREVET**

(21) Numéro de la demande: 070651/2021

(71) Requéérant:
The Swatch Group Research and Development Ltd,
Rue des Sors 3
2074 Marin (CH)

(22) Date de dépôt: 06.12.2021

(72) Inventeur(s):
Christian Manasterski, 2019 Rochefort (CH)
Cédric Faure, 2016 Cortaillod (CH)

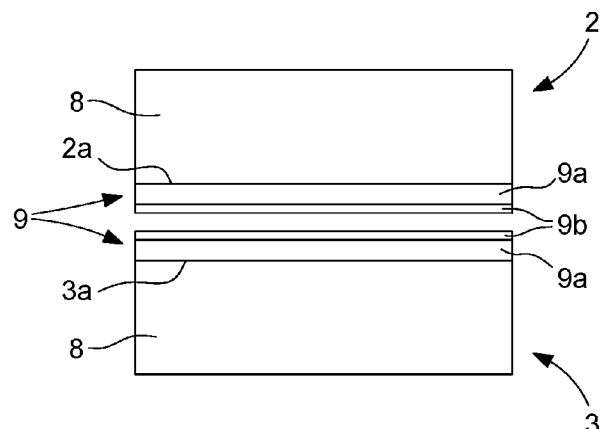
(43) Demande publiée: 15.06.2023

(74) Mandataire:
ICB Ingénieurs Conseils en Brevets SA,
Faubourg de l'Hôpital 3
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **Ensemble fonctionnel de micromécanique avec un revêtement tribologique.**

(57) La présente invention concerne un ensemble fonctionnel (1) de micromécanique comprenant au moins une première pièce (2) avec une première surface fonctionnelle (2a) destinée à venir en contact de frottement avec une deuxième surface fonctionnelle (3a), ladite deuxième surface fonctionnelle appartenant, soit à ladite première pièce (2) soit à au moins une deuxième pièce (3) constituant avec ladite première pièce (2) ledit ensemble fonctionnel (1), ledit ensemble fonctionnel (1) étant caractérisé en ce que la première surface fonctionnelle (2a) et la deuxième surface fonctionnelle (3a) sont formées d'une première couche (9a) comprenant du diamant ultrananocristallin, nanocristallin ou microcristallin, ladite première couche (9a) étant surmontée d'une deuxième couche (9b) comportant des atomes de S et de F.

Elle se rapporte également au procédé de fonctionnalisation du diamant.



Description

Domaine technique de l'invention

[0001] La présente invention concerne un ensemble fonctionnel de micromécanique comprenant au moins une pièce munie de surfaces soumises à un contact par frottement nécessitant un revêtement tribologique. L'ensemble fonctionnel de micromécanique se rapporte plus spécifiquement à un couple de pièces micromécaniques horlogères coopérant mécaniquement l'une avec l'autre telles qu'une roue d'échappement et des palettes d'une ancre.

Arrière-plan technologique

[0002] Lors de l'apparition des technologies de dépôt de diamant par voie chimique en phase gazeuse (diamant CVD), beaucoup d'espoirs avaient été émis concernant la tribologie, grâce à la dureté intrinsèque du diamant. Malheureusement, le frottement à sec entre deux surfaces de diamant n'est pas tribologiquement viable car il conduit à une adhésion entre les pièces horlogères en contact. Ceci est dû à la création de liaisons entre les atomes de carbone (C-C) des deux matériaux partenaires du couple Diamant vs Diamant. Pour minimiser cet effet adhésif, le couple de matériaux Diamant vs Diamant doit être en présence d'un environnement doté d'une humidité relative (%HR) au moins égale à 50%. Cette valeur seuil de 50%HR permet l'approvisionnement de microgouttelettes d'eau (H₂O) dans la surface de contact. Ceci diminue alors l'effort tangentiel de déplacement F_T d'une surface par rapport à une autre surface. Ces microgouttelettes jouent donc le rôle de lubrifiants locaux favorisant le mouvement relatif des pièces horlogères en contact. Sous cette valeur seuil, le phénomène d'adhésion est exacerbé, avec des instabilités de contact intervenant sur des temps de sollicitations courts.

[0003] Ainsi, dans les conditions de contact existant en mouvement (effort normal faible et effort tangentiel élevé), le coefficient de frottement global, noté CoF (Coefficient Of Friction), du couple Diamant vs Diamant peut être inférieur à 0.2 comme illustré à la figure 1. Malheureusement, ces conditions environnementales ne garantissent pas la stabilité tribologique du couple de matériaux au-delà de 5 minutes de test. En effet, des instabilités de frottement apparaissent dès 3.5 minutes de test.

[0004] Le défi réside donc dans le fait d'utiliser ce couple Diamant/Diamant dans un ensemble fonctionnel micromécanique en garantissant sans lubrifiant un comportement tribologique stable sur une plus longue durée.

Résumé de l'invention

[0005] L'invention a pour objet de pallier aux désavantages précités en modifiant les propriétés tribologiques de la couche de diamant. En effet, comme expliqué précédemment, les atmosphères d'hydrogène, d'oxygène ou d'humidité sont, en utilisation sur le long terme, difficiles à tenir. L'objet de l'invention est de remplacer le lien atomique OH ou H de passivation provoqué par les milieux cités ci-dessus par d'autres molécules. Ces modifications d'extrême surface destinées à changer les propriétés tribologiques sont réalisées, selon l'invention, en fonctionnalisant la couche de diamant. Plus précisément, selon l'invention, la couche de diamant est fonctionnalisée avec un composé de soufre et de fluor.

[0006] Ainsi, la présente invention se rapporte à un ensemble fonctionnel de micromécanique comprenant au moins une première pièce avec une première surface fonctionnelle destinée à venir en contact de frottement avec une deuxième surface fonctionnelle, ladite deuxième surface fonctionnelle appartenant, soit à ladite première pièce soit à au moins une deuxième pièce constituant avec ladite première pièce ledit ensemble fonctionnel, ledit ensemble fonctionnel étant caractérisé en ce que la première surface fonctionnelle et la deuxième surface fonctionnelle sont formées d'une première couche comprenant du diamant ultranancristallin, nanocristallin ou microcristallin, ladite première couche étant surmontée d'une deuxième couche comportant des atomes de S et de F. On comprendra que la première couche peut être de matière avec le substrat constituant les première et deuxième pièces ou distincte du substrat.

[0007] Une amélioration du comportement tribologique de ces surfaces fonctionnelles a été observée lors d'essais. Cette amélioration pourrait être attribuée au S permettant de se préserver de l'apparition de liaisons (C-C) lorsque l'humidité relative n'est plus suffisante pour jouer ce rôle. Ainsi, il est possible de prévoir un fonctionnement d'un système mobile horloger, tel qu'un échappement à ancre suisse sans lubrification du contact palette/roue d'échappement, avec des performances au moins équivalentes à celles des références standards.

[0008] Cette amélioration du comportement tribologique est plus particulièrement observée lorsque les deux surfaces fonctionnelles en contact sont revêtues avec une couche tribologique de même composition.

[0009] La présente invention se rapporte également au procédé de fonctionnalisation du diamant par gravure ionique réactive. La gravure ionique réactive est généralement utilisée pour la gravure profonde sur silicium. Il a été constaté par les inventeurs qu'en utilisant un équipement de gravure par ions réactifs à très faible puissance, typiquement entre 30 et 70 W, il est possible de synthétiser ce composé de S et F sur une pièce, telle une pièce d'horlogerie qui a de faibles dimensions.

Brève description des figures

[0010] Les buts, avantages et caractéristiques apparaîtront à la lumière des figures suivantes :

- la figure 1 représente la courbe du coefficient de frottement global ($CoF_{(global)}$) en fonction du temps, du couple diamant microcristallin/diamant microcristallin non lubrifié selon l'art antérieur, pour un taux d'humidité relative de 30%.
- la figure 2 représente schématiquement en coupe une portion de deux pièces de l'ensemble fonctionnel selon l'invention.
- la figure 3 représente partiellement un ensemble fonctionnel comprenant deux pièces, à savoir une roue d'échappement et une palette d'ancre avec des surfaces de contact fonctionnalisées selon l'invention.
- la figure 4 représente une image en microscopie électronique de la morphologie de la deuxième couche de S et F, avec une structure en bâtonnets.
- les figures 5a et 5b représentent respectivement les résultats tribologiques pour une distance de 25m, pour un ensemble fonctionnel comprenant deux pièces. A la figure 5a, à titre comparatif non couvert par l'invention, une pièce est revêtue sur sa surface fonctionnelle de diamant microcristallin MCD et l'autre pièce de diamant microcristallin fonctionnalisé au SF6. A la figure 5b, selon l'invention, les deux pièces sont revêtues sur leur surface fonctionnelle de diamant microcristallin fonctionnalisé au SF6.
- la figure 6 représente les résultats tribologiques pour le couple de la figure 5b sur une plus longue distance de 2500m.
- les figures 7a et 7b représentent l'amplitude du balancier respectivement pour un couple roue d'échappement/ancre de référence et un couple roue d'échappement/ancre selon l'invention avec une couche de diamant microcristallin fonctionnalisé au SF6.
- la figure 8 est une vue schématique de l'équipement utilisé pour la fonctionnalisation du diamant.

Description détaillée de l'invention

[0011] La présente invention se rapporte à un ensemble fonctionnel comprenant au moins une pièce soumise sur sa ou ses surfaces dites fonctionnelles ou de contact aux frottements. L'ensemble fonctionnel selon l'invention peut comporter une seule pièce avec deux surfaces fonctionnelles destinées à être en contact par frottement. Par exemple, dans le domaine horloger, il peut s'agir d'un ressort de barillet formé d'une lame avec une face du ressort destinée à être en contact avec une autre face du ressort. En variante, l'ensemble fonctionnel peut comporter au moins deux pièces avec respectivement chaque pièce comportant une surface fonctionnelle destinée à être soumise aux frottements avec une surface fonctionnelle d'une autre pièce. Par exemple, dans le domaine horloger, l'ensemble fonctionnel 1 peut comporter une première pièce 2 qui est une palette 4 d'une ancre 5 et une deuxième pièce 3 qui est une roue d'échappement 6 tel que représenté à la figure 3. Plus précisément, la palette 4 présente un plan de repos A et un plan d'impulsion B qui coopèrent avec les plans de repos C et d'impulsion D de la dent 7 de la roue d'échappement 6. Ces plans A, B, C, D sont des surfaces fonctionnelles fortement sollicitées et sujettes à des niveaux élevés de frottement et/ou contact pouvant requérir une couche tribologique selon l'invention pour réduire le frottement. Dans une autre application horlogère, la première pièce peut être un axe d'un mobile et la deuxième pièce un palier. Selon une autre application dans ce domaine, les première et deuxième pièces peuvent être des dentures de roues d'engrenage.

[0012] Tel que schématisé à la figure 2, l'ensemble fonctionnel 1 comporte la première pièce 2 et la deuxième pièce 3 formées d'un substrat 8 avec au moins au niveau de leur surface fonctionnelle 2a,3a la couche tribologique 9. Cette couche 9 est constituée d'une première couche de diamant 9a qui peut être du diamant ultrananocristallin (UNCD, d'après la dénomination anglaise Ultrananocrystalline Diamond), nanocristallin (NCD, d'après la dénomination anglaise Nanocrystalline Diamond) ou microcristallin (MCD, d'après la dénomination anglaise Microcrystalline Diamond). Selon l'invention, cette première couche 9a est fonctionnalisée avec un composé sulfuré, et plus spécifiquement du S et du F, qui forme une deuxième couche 9b sur la première couche 9a. Avantagusement, la première couche 9a est fonctionnalisée avec du SF6. D'autres gaz, bien que plus dangereux et d'usage plus limité, tels que le SF2 et le SF4, sont envisageables. Généralement, le S et F fonctionnalisés à la surface de la couche de diamant se présentent sous forme de bâtonnets tels que montrés à la figure 4. La deuxième couche de S et F est généralement d'épaisseur non constante et de taille nanométrique avec typiquement une épaisseur moyenne comprise entre 2 et 50 nm, plus spécifiquement entre 5 et 10 nm. Les techniques adaptées pour visualiser et analyser chimiquement la deuxième couche de S et F sont par exemple la spectrométrie photoélectronique X (en anglais, X-Ray photoelectron spectrometry : XPS) ou la spectrométrie de masse de type TOF-SIMS (en anglais, Time Of Flight Secondary Ion Mass Spectrometry). On notera que la couche étant extrême fine, il peut s'avérer difficile d'identifier précisément le composé présent. On parlera donc d'une couche comprenant du S et du F.

[0013] Selon l'invention, les surfaces destinées à être mises en contact sont chacune recouvertes de la couche de diamant fonctionnalisé au S et au F. La couche 9 incluant la première couche de diamant 9a et la deuxième couche 9b de S et de F a une épaisseur moyenne comprise entre 800 nm et 1200 nm, de préférence entre 900 et 1200 nm, et ce que ce soit du diamant MCD, NCD ou encore UNCD.

[0014] A titre d'exemple, les substrats pourront être choisis parmi l'ensemble des matériaux comprenant les céramiques, le silicium, le silicium oxydé, le silicium nitruré, le silicium carburé et les aciers. Il est également envisageable que le substrat et la couche de diamant forment un seul matériau massif. Selon un mode de réalisation préféré, le substrat est en silicium avec une couche de diamant microcristallin fonctionnalisé avec du S et du F.

[0015] Le procédé de fonctionnalisation de la couche de diamant est le suivant. Au préalable, la couche de diamant est déposée par voie chimique en phase vapeur (CVD) ou par la technique des filaments chauds et ce si le substrat n'est pas en diamant massif. Ensuite, le soufre et le fluor sont déposés sous forme d'une deuxième couche ultra fine sur la couche de diamant par un procédé d'attaque par ions réactifs (RIE pour Reactive Ion Etching) à très faible puissance afin de réaliser un dépôt plutôt qu'un gravage. L'équipement 10 pour la fonctionnalisation du diamant avec le réacteur plasma 11 est schématisé à la figure 8. Il peut par exemple être du type „à couplage capacitif“.

[0016] Les paramètres du procédé sont les suivants :

- Gaz réactif (12) comprenant du S et du F tel que le SF₆, SF₄ ou SF₂, avec un débit compris entre 3 et 20 sccm (pour Standard Cubic Centimeter per Minute), soit des cm³ · min⁻¹, de préférence entre 5 et 10 sccm,
- Puissance radiofréquence (RF) comprise entre 30 et 70W, de préférence entre 40 et 60W,
- Pression dans le réacteur comprise entre 30 et 150 µbar, de préférence entre 80 et 120 µbar,
- Temps de réaction compris entre 20 et 120 minutes, de préférence entre 30 et 70 minutes.

[0017] La deuxième couche fonctionnalisée ainsi obtenue a une épaisseur très faible, de l'ordre de quelques nanomètres, même avec un temps de réaction de l'ordre de l'heure.

[0018] Des essais ont été réalisés pour évaluer le comportement tribologique d'un ensemble fonctionnel selon l'invention.

[0019] Des roues d'échappement en Si ainsi que des levées de palettes en Si ont été revêtues avec du diamant microcristallin fonctionnalisé au S et au F et plus spécifiquement au SF₆. Les tests sont donc effectués avec un couple diamant fonctionnalisé sur diamant fonctionnalisé et comparé avec une ancre standard avec un contact acier lubrifié sur rubis. Des tests FEMTO-torque ont été réalisés pour mesurer le rendement d'un échappement à ancre suisse monté sur une platine de travail. Le couple appliqué était de 16 µN.m. La mesure de l'amplitude du balancier (à 3 bras) est représentée aux figures 7a et 7b respectivement pour l'ancre standard et l'ancre traitée selon l'invention. Pour l'ancre standard, l'amplitude moyenne est de 274° pour une heure de test. Pour l'ancre traitée selon l'invention, l'amplitude moyenne est de 256° pour une heure de test, soit 18° en dessous de celle de l'ancre standard. A part la défaillance temporaire à 700s, on constate que la régularité de l'amplitude est très bonne, voire meilleure que sur la version standard de référence.

[0020] En parallèle, des tests tribologiques ont également été réalisés avec un tribomètre bille/plan avec une bille de 2 mm de diamètre pour une distance de 25 mètres et de 2500 mètres. Les essais sur 25 mètres ont été effectués avec un couple bille/plan ayant chacun un substrat en Si avec une couche de diamant fonctionnalisé au SF₆ (SF₆//SF₆) et avec un couple comparatif bille/plan où la bille est un substrat en Si revêtu de diamant microcristallin sans fonctionnalisation et où le plan est un substrat en Si revêtu de diamant microcristallin fonctionnalisé selon l'invention (MCD//SF₆). Ces essais ont pour objet de mettre en avant l'avantage de fonctionnaliser les deux surfaces en contact. Les essais ont été réalisés avec une force normale de 10 mN, une vitesse de glissement de 10 mm/s et une amplitude de 4 mm. Le coefficient de frottement dynamique en fonction de la distance est représenté aux figures 5a et 5b respectivement pour le couple comparatif et le couple selon l'invention. On constate pour le couple comparatif que le coefficient de frottement moyen est supérieur à 0.1. Il est peu stable avec de nombreux pics. Par contre, pour le couple selon l'invention, le coefficient de frottement moyen est inférieur à 0.1 et stable. Sur ce même couple selon l'invention, un test plus long sur une distance de 2500 mètres a été réalisé. Le résultat est présenté à la figure 6. Le coefficient de frottement moyen est faible et identique à celui du test court de 25 mètres. Après une petite période de rodage, le coefficient de frottement est stable sur toute la période de test.

[0021] Ainsi, les tests FEMTO-torque et les tests tribologiques confirment le très bon comportement en utilisation du couple diamant fonctionnalisé sur diamant fonctionnalisé.

Légende

[0022]

- (1) Ensemble fonctionnel
- (2) Première pièce
 - a) Première surface de contact, aussi dite surface fonctionnelle
- (3) Deuxième pièce

- a) Deuxième surface de contact, aussi dite surface fonctionnelle
- (4) Palette
 - A. Plan de repos
 - B. Plan d'impulsion
- (5) Ancre
- (6) Roue d'échappement
- (7) Dent
 - C. Plan de repos
 - D. Plan d'impulsion
- (8) Substrat
- (9) Couche tribologique
 - a) Première couche comprenant du diamant
 - b) Deuxième couche comprenant du S et du F
- (10) Equipement pour la fonctionnalisation
- (11) Réacteur
- (12) Gaz
- (13) Plasma
- (14) Electrodes

Revendications

1. Ensemble fonctionnel (1) de micromécanique comprenant au moins une première pièce (2) formée d'un premier substrat (8) surmonté d'une première surface fonctionnelle (2a) destinée à venir en contact de frottement avec une deuxième surface fonctionnelle (3a), ladite deuxième surface fonctionnelle appartenant, soit à ladite première pièce (2) soit à au moins une deuxième pièce (3) formée d'un deuxième substrat surmonté de ladite deuxième surface fonctionnelle (3a), la deuxième pièce (3) constituant avec ladite première pièce (2) ledit ensemble fonctionnel (1), ledit ensemble fonctionnel (1) étant caractérisé en ce que la première surface fonctionnelle (2a) et la deuxième surface fonctionnelle (3a) sont formées d'une première couche (9a) qui est soit de matière avec le premier substrat (8) et le deuxième substrat (8) soit distincte du premier substrat (8) et du deuxième substrat (8), la première couche (9a) comprenant du diamant ultrananocristallin, nanocristallin ou microcristallin et étant surmontée d'une deuxième couche (9b) comportant des atomes de S et de F.
2. Ensemble fonctionnel (1) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la deuxième couche (9b) comporte du SF₆.
3. Ensemble fonctionnel (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la deuxième couche (9b) est formée de bâtonnets.
4. Ensemble fonctionnel (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la deuxième couche (9b) a une épaisseur moyenne comprise entre 2 et 50 nm, de préférence entre 5 et 10 nm.
5. Ensemble fonctionnel (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la première pièce (2) est une palette (4) et en ce que la deuxième pièce (3) est une roue d'échappement (6).
6. Ensemble fonctionnel (1) selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la première pièce (2) est un axe d'un mobile et en ce que la deuxième pièce (3) est un palier.
7. Ensemble fonctionnel (1) selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la première pièce (2) et la deuxième pièce (3) sont des dentures de roues d'engrenage.
8. Ensemble fonctionnel (1) selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ladite deuxième surface fonctionnelle appartient à ladite première pièce (2) et en ce que la première pièce (2) est un ressort de barillet formé d'une

lame et en ce qu'une face avant de ladite lame forme ladite première surface fonctionnelle et en ce que la face arrière de ladite lame forme ladite deuxième surface fonctionnelle.

9. Ensemble fonctionnel (1) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le premier substrat (8) et le deuxième substrat (8) sont choisis parmi les céramiques, le silicium, le silicium oxydé, le silicium nitruré, le silicium carburé et les aciers, lorsque ladite première couche (9a) est distincte du premier substrat (8) et du deuxième substrat (8).
10. Procédé de fonctionnalisation du diamant ultrananocristallin, nanocristallin ou microcristallin, comprenant les étapes suivantes :
 - a) Mise à disposition d'au moins un premier substrat (8) revêtu d'une première couche (9a) dudit diamant ultrananocristallin, nanocristallin ou microcristallin ou mise à disposition d'au moins un premier substrat (8) en diamant ultrananocristallin, nanocristallin ou microcristallin,
 - b) Fonctionnalisation dudit premier substrat (8) de l'étape a) dans un équipement (10) d'attaque par ions réactifs muni d'un réacteur (11) et d'électrodes (14), la fonctionnalisation étant opérée avec une puissance radiofréquence comprise entre 30 et 70W, avec comme gaz réactif (12) un composé comprenant du S et du F.
11. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le composé est du SF₆.
12. Procédé selon la revendication 10 ou 11, caractérisé en ce que la puissance radiofréquence est comprise entre 40 et 60W.
13. Procédé selon l'une des revendications 10 à 12, caractérisé en ce que la tension entre les électrodes (14) est comprise entre 130 et 170V, de préférence entre 140 et 155V.
14. Procédé selon l'une des revendications 10 à 13, caractérisé en ce que la pression dans le réacteur (11) est comprise entre 30 et 150 µbar, de préférence entre 80 et 120 µbar.
15. Procédé selon l'une des revendications 10 à 14, caractérisé en ce que le débit du gaz réactif (12) dans le réacteur (11) est compris entre 3 et 20 sccm, de préférence entre 5 et 10 sccm.
16. Procédé selon l'une des revendications 10 à 15, caractérisé en ce que le temps de fonctionnalisation du premier substrat (8) dans le réacteur (11) est compris entre 20 et 120 minutes, de préférence entre 30 et 70 minutes.
17. Procédé selon l'une des revendications 10 à 16, caractérisé en ce que l'équipement (10) est doté d'un couplage de plasma capacitif.

Fig. 1
(art antérieur)

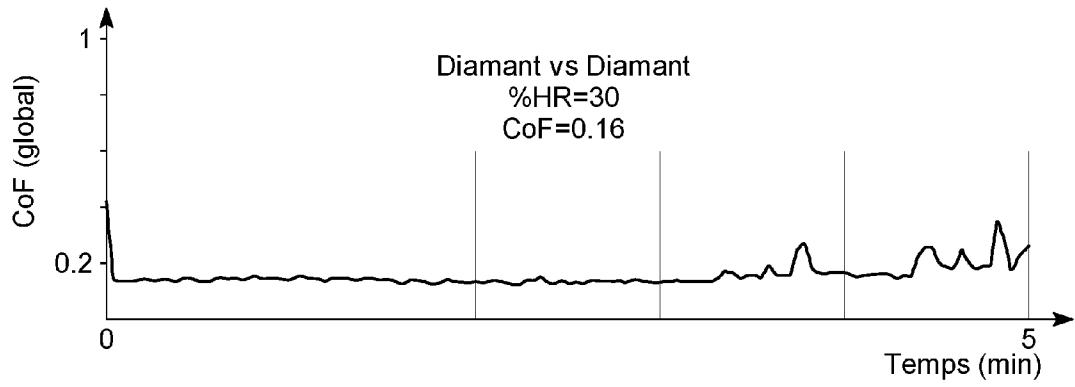


Fig. 2

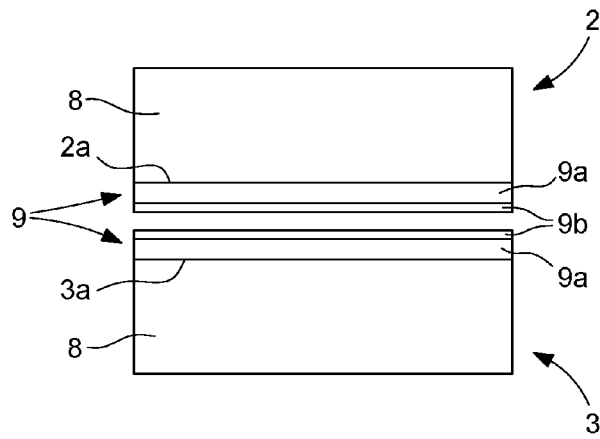


Fig. 3

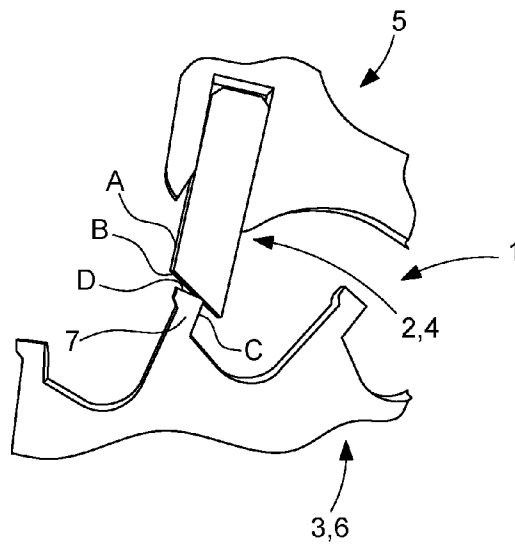


Fig. 4



Fig. 5a
(art antérieur)

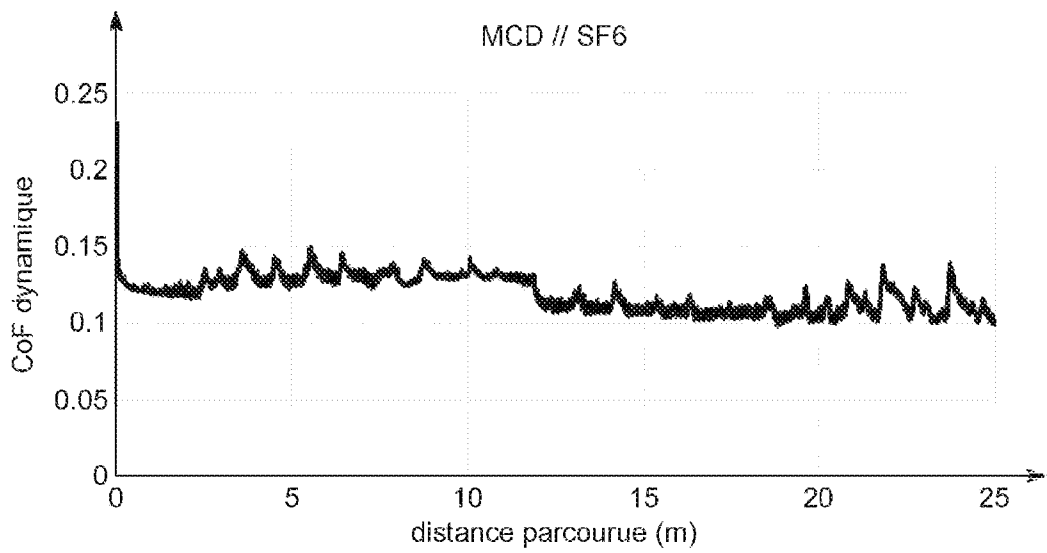


Fig. 5b

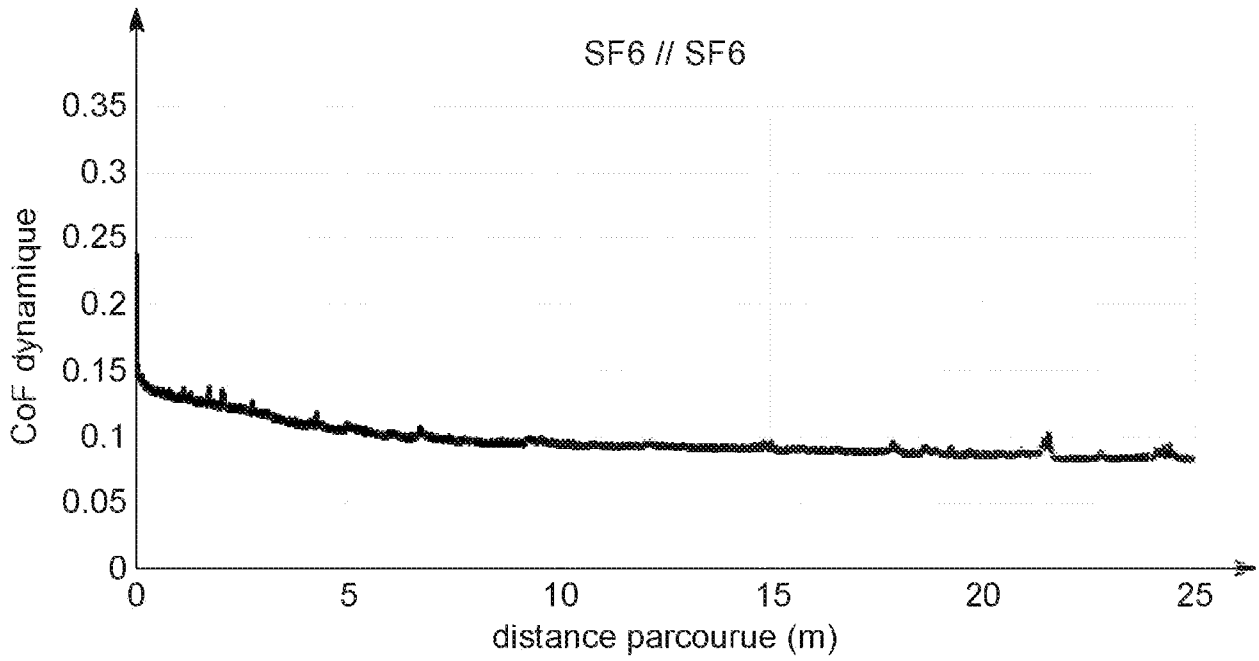


Fig. 6

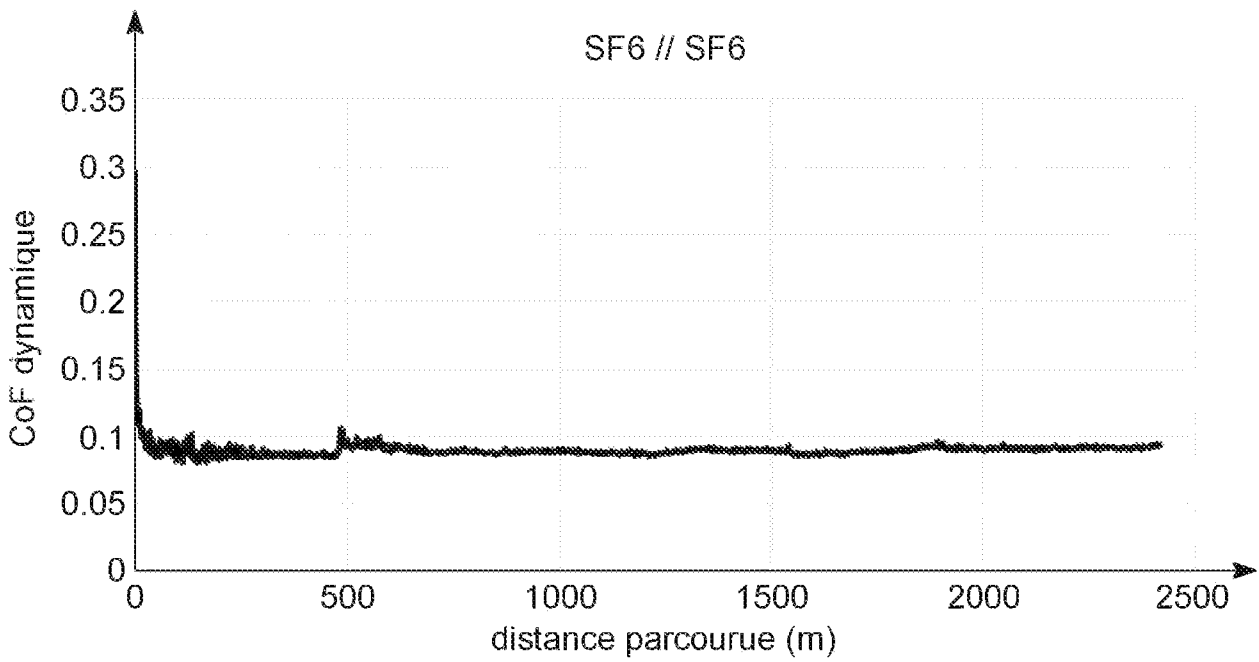


Fig. 7a
(art antérieur)

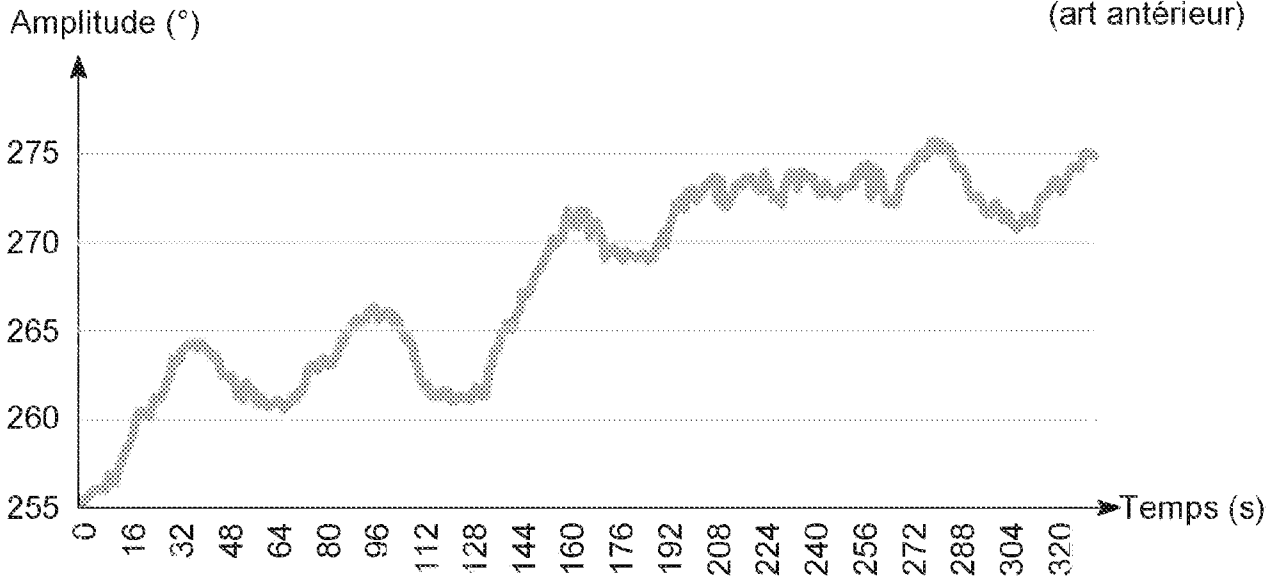


Fig. 7b

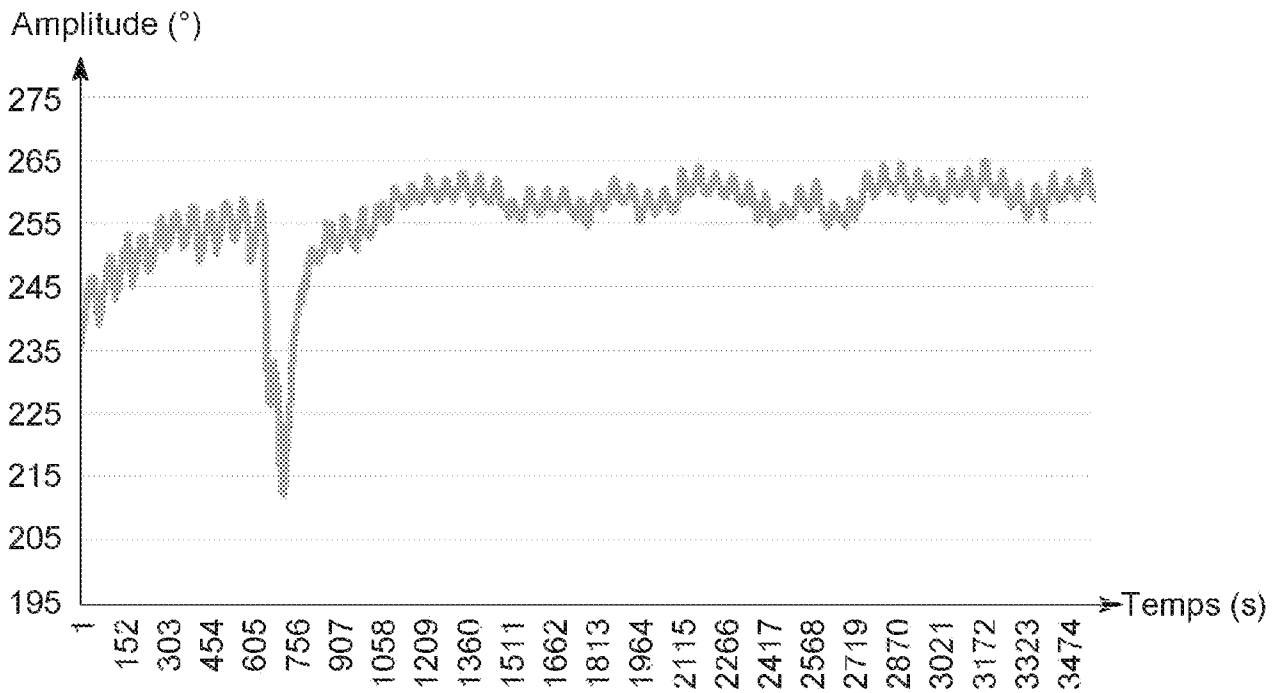


Fig. 8

10

