

(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  
18 novembre 2004 (18.11.2004)

PCT

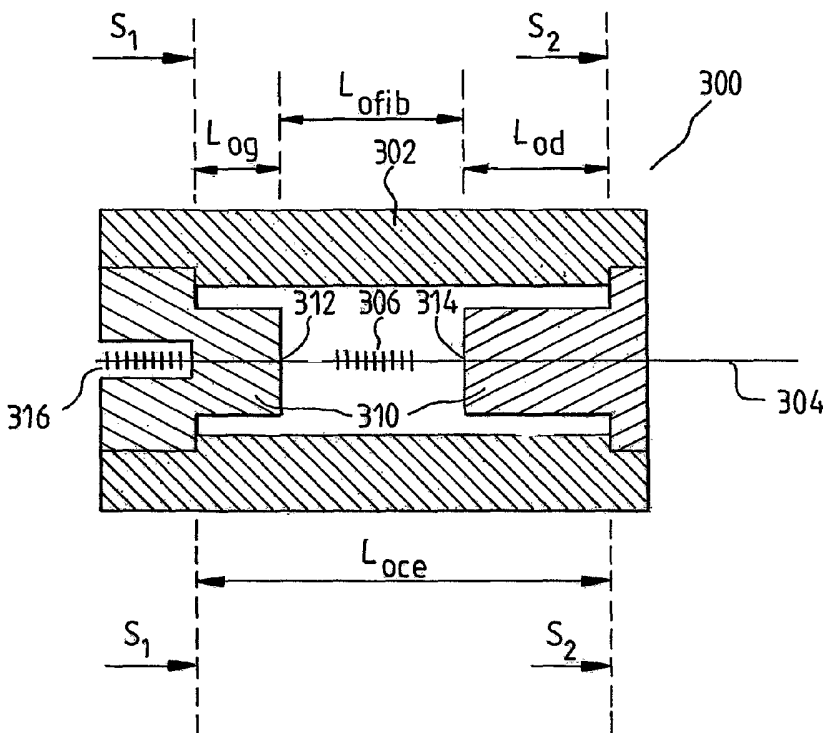
(10) Numéro de publication internationale  
WO 2004/099713 A2

- (51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : G01B 11/16 (72) Inventeur; et  
(21) Numéro de la demande internationale : PCT/FR2004/001130 (75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : MORIN, Laurent [FR/FR]; Bâtiment A, Résidence les Essarts, 26, rue de chartres, F-91400 Orsay (FR).  
(22) Date de dépôt international : 7 mai 2004 (07.05.2004) (74) Mandataire : GRYNWALD, Albert; 127, rue du Faubourg Poissonnière, F-75009 Paris (FR).  
(25) Langue de dépôt : français (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, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH,  
(26) Langue de publication : français  
(30) Données relatives à la priorité : 03/05584 7 mai 2003 (07.05.2003) FR  
(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR]; 31-33, rue de la Fédération, F-75015 Paris (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: UNIAXIAL THERMAL AND/OR MECHANICAL DEFORMATION-MEASURING DEVICE, SYSTEM AND METHOD EMPLOYING A BRAGG GRATING OPTICAL FIBRE

(54) Titre : DISPOSITIF, SYSTEME ET PROCÉDE DE MESURE DE DEFORMATIONS MECANIQUES ET/OU THERMIQUES UNIAXIALES AU MOYEN D'UNE FIBRE OPTIQUE A RESEAU DE BRAGG



(57) Abstract: The invention relates to a uniaxial deformation-measuring device consisting of: a section of optical fibre comprising at least one Bragg grating which is aligned with the direction of the measurement axis; and a test body which is subjected to the deformations to be measured and which transmits same to the section of optical fibre. The inventive device is characterised in that: (i) fixing points, which are designed to subject the fibre section to a negative, positive or zero preload and to transmit the elongations experienced in the test body thereto, are separated by a distance ( $L_{fib}$ ) presenting a variation ( $\Delta L_{fib}$ ) when the test body is stressed by the deformation to be measured; (ii) the effective length ( $L_{ce}$ ) of the test body presents an elongation ( $\Delta L_{ce}$ ) when the test body is stressed by the deformation to be measured; and the length ( $L_{fib}$ ) of the section of optical fibre and the effective length ( $L_{ce}$ ) of the

measurement body are such that the longitudinal deformation ( $\Delta L_{fib}/L_{fib}$ ) experienced by the section of optical fibre is strictly greater than the originating deformation ( $\Delta L_{ce}/L_{ce}$ ) of the test body, thereby defining an amplification factor K which is strictly greater than 1 and which is equal to the quotient ( $\Delta L_{fib}/L_{fib}$ )/( $\Delta L_{ce}/L_{ce}$ )

[Suite sur la page suivante]

WO 2004/099713 A2



PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **États désignés** (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, IT, LU, 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 :**

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

*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.*

---

at the first order.

(57) **Abrégé :** Dispositif de mesure de déformations uniaxiales comprenant un tronçon de fibre optique muni d'au moins un réseau de Bragg aligné selon la direction de l'axe de mesure, et un corps d'épreuve soumis aux déformations à mesurer et les transmettant au tronçon de fibre optique, ce dispositif étant caractérisé en ce que : les points de fixation aptes à soumettre ce tronçon de fibre à une précontrainte négative, positive ou nulle, et à lui transmettre les elongations du corps d'épreuve, sont séparés par une distance ( $L_{fib}$ ) présentant une variation ( $\Delta L_{fib}$ ) lorsque le corps d'épreuve est sollicité par la déformation à mesurer, la longueur effective ( $L_{ce}$ ) du corps d'épreuve présente une elongation ( $\Delta L_{ce}$ ), lorsque le corps d'épreuve est sollicité par la déformation à mesurer, - la longueur ( $L_{fib}$ ) du tronçon de fibre optique et la longueur effective ( $L_{ce}$ ) du corps de mesure sont telles que la déformation longitudinale ( $\Delta L_{fib}/L_{fib}$ ) du tronçon de la fibre optique est strictement supérieure à la déformation ( $\Delta L_{ce}/L_{ce}$ ) du corps d'épreuve qui en est à l'origine, définissant ainsi un coefficient d'amplification  $K$  strictement supérieur à 1, et égal au premier ordre au quotient ( $\Delta L_{fib}/L_{fib}$ ) / ( $\Delta L_{ce}/L_{ce}$ ).

## 1

5 **DISPOSITIF, SYSTEME ET PROCEDE DE MESURE DE  
DEFORMATIONS MECANIQUES ET/OU THERMIQUES  
UNIAXIALES AU MOYEN D'UNE FIBRE OPTIQUE A RESEAU  
DE BRAGG**

10

La présente invention se rapporte à un dispositif, à un système et à un procédé de mesure de déformations mécaniques et/ou thermiques au moyen d'une fibre optique à réseau de Bragg, notamment pour mesurer une force et/ou une  
15 température.

**I. L'art antérieur**

Une fibre optique 110 (figure 1) transmet un rayonnement électromagnétique 112, maintenu dans son cœur optique 114 grâce à une différence entre l'indice de réfraction  $n_c$  du cœur optique 114 et l'indice de réfraction  $n_g$  de la gaine optique (cladding) 116, avec une faible atténuation, de l'ordre de 0,20 dB/km pour une transmission avec une longueur d'onde  
25 de 1,55  $\mu\text{m}$ .

Par ailleurs, une gaine mécanique (coating) 118 entoure la fibre optique 110 de façon à permettre sa manipulation sans fragiliser cette dernière. De façon classique, cette gaine 118 est constituée de polyacrylate ou de polyimide.

L'indice  $n_c$  de réfraction du coeur optique 114 peut localement subir une modulation longitudinale dans le coeur optique, selon une période spatiale  $\Lambda$  ou « pas », pour que la fibre optique réfléchisse le rayonnement se propageant à une  
5 longueur d'onde  $\lambda_B$  donnée. Cette modulation locale longitudinale d'indice constitue un réseau de Bragg et la longueur d'onde  $\lambda_B$  réfléchi est dénommée longueur d'onde de Bragg caractéristique du réseau.

Cette longueur d'onde  $\lambda_B$  peut être prédéterminée au  
10 moyen de la relation de Bragg qui s'écrit, au premier ordre :

$$\lambda_B = 2 \Lambda n_e(T, \lambda, [\varepsilon_{3 \times 3}]) \quad (1)$$

où  $\Lambda$  est le pas caractéristique du réseau de Bragg  
15 inscrit dans la fibre optique,  $n_e$  est l'indice effectif du mode fondamental guidé de la fibre optique,  $T$  la température de la fibre optique au niveau du réseau,  $\lambda$  la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique et  $[\varepsilon_{3 \times 3}]$  le tenseur 3 x 3 des déformations de Green-Lagrange de la fibre.

Ce tenseur  $[\varepsilon_{3 \times 3}]$  des déformations de Green-Lagrange de la fibre est fonction des variations locales des dimensions de la fibre telles que sa longueur. Ces dimensions peuvent varier en fonction, par exemple de la pression hydrostatique s'appliquant sur le tronçon de fibre optique  
25 portant le réseau de Bragg.

Il apparaît donc que la longueur d'onde de Bragg  $\lambda_B$  d'un réseau de Bragg est fonction de paramètres physiques, mécaniques et/ou thermiques, influant sur ce réseau.

De ce fait, une fibre optique munie d'au moins un réseau de Bragg peut être utilisée pour mesurer des paramètres physiques, par exemple lorsque ces paramètres physiques influent sur la longueur  $L_{\text{fib}}$  de la fibre optique au niveau d'un  
5 réseau de Bragg de telle sorte qu'une variation de ce paramètre entraîne une modification de la longueur d'onde caractéristique  $\lambda_B$  du réseau de Bragg.

Il convient de préciser que l'expression « déformation de la fibre optique » comprend les déformations mécaniques,  
10 par exemple générées par une action mécanique telle qu'une force d'élongation exercée sur la fibre, et les déformations thermiques générées par une variation de température. Par exemple, une variation de température peut engendrer une variation de l'indice effectif de la fibre. De fait, la température  $T$   
15 à laquelle est soumis un réseau de Bragg modifie sa longueur d'onde caractéristique  $\lambda_B$ .

Par ailleurs, il est connu que la détermination d'une déformation mesurée par un réseau de Bragg est optimale lorsque sa déformation reste homogène, c'est-à-dire lorsque le  
20 réseau passe d'un pas  $\Lambda$  au repos à un pas  $\Lambda_m$  sous l'effet d'une variation de la grandeur à mesurer. Une absence de gradient de déformation le long du réseau garantit une telle homogénéité.

La mesure de la variation d'un paramètre s'effectue au moyen d'un faisceau lumineux envoyé dans la fibre optique à  
25 partir d'une de ses extrémités, ce faisceau comportant au moins la longueur d'onde  $\lambda_B$  d'un réseau de Bragg inscrit dans cette fibre optique, ainsi que les longueurs d'ondes de Bragg de ce réseau lorsqu'il est soumis à des variations du paramètre physique mesuré.

Plus précisément, la longueur d'onde  $\lambda_B$  caractéristique du réseau de Bragg présente une variation  $\Delta\lambda_B$  lorsque, par exemple, une variation  $\Delta T$  de sa température,  $\Delta L_{\text{fib}}$  de la longueur de la fibre optique et/ou  $\Delta P$  de la pression hydrostatique se produit au niveau du réseau de Bragg réfléchissant cette longueur d'onde  $\lambda_B$ .

Lorsque la fibre est déformée de façon uniaxiale selon son axe de propagation optique, une telle relation peut être formulée en différentiant la relation (1) en fonction de la température  $T$ , de la longueur  $L_{\text{fib}}$  de la fibre optique comprenant le réseau de Bragg et de la pression hydrostatique  $P$  entourant cette fibre optique au niveau du réseau de Bragg. Il vient alors :

$$\Delta'\lambda_B/\lambda_B = a' \Delta T + b' \Delta\varepsilon_{\text{fib}} + c' \Delta P \quad (2)$$

où  $a'$ ,  $b'$  et  $c'$  sont, dans une première approximation, des constantes propres à la nature de la fibre optique considérée et  $\Delta'\lambda_B$  la variation de la longueur d'onde caractéristique  $\lambda_B$  du réseau de Bragg,  $\Delta\varepsilon_{\text{fib}}$  est la variation de déformation mécanique longitudinale de la fibre, égale au premier ordre au quotient  $\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}}$  de la variation d'origine mécanique  $\Delta L_{\text{fib}}$  de la longueur  $L_{\text{fib}}$  de la fibre optique.

Un dispositif de mesure est généralement conçu de telle sorte que seule la grandeur à mesurer agisse sur le signal  $\Delta'\lambda_B/\lambda_B$  effectivement mesuré. A cet effet, il utilise un corps d'épreuve 123 (figure 1b) sur lequel est fixé, au moyen de deux points de fixations 121 et 125, le tronçon de fibre 110 de

longueur  $L_{\text{fib}}$  sur lequel est inscrit au moins un réseau de Bragg 124.

Dans ce cas, la relation (2) s'écrit sous la forme :

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = a \Delta T + b \Delta\varepsilon_{\text{ce}} + c \Delta P \quad (3)$$

où  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont des constantes respectivement dépendantes de  $a'$ ,  $b'$  et  $c'$ , prenant en compte la géométrie du corps d'épreuve 123 et ses caractéristiques thermomécaniques.

En outre,  $\Delta\varepsilon_{\text{ce}}$  représente la variation de déformation mécanique du corps d'épreuve 123, égale au premier ordre au quotient  $\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}}$  de la variation d'origine mécanique  $\Delta L_{\text{ce}}$  de la longueur  $L_{\text{ce}}$  du corps d'épreuve.

En négligeant l'influence de la pression ( $c \Delta P$ ), cette relation (3) permet, à partir de la mesure des variations  $\Delta\lambda_B$  de la longueur d'onde réfléchiée par le réseau de Bragg 124 de la fibre optique 110, de mesurer une déformation due à :

- une variation de la température à laquelle est soumis le réseau de Bragg 124, et/ou
- une variation de la déformation  $\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}}$  entre les points d'ancrage 121 et 125 du tronçon de la fibre optique 110 portant le réseau de Bragg 124.

Une telle mesure de variation de déformation  $\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}}$  du corps d'épreuve 123 peut être utilisée pour mesurer une variation de force  $\Delta F$  s'exerçant sur ce corps d'épreuve 123. De fait, connaissant les propriétés thermomécaniques et la géométrie du corps d'épreuve, il est possible d'établir une correspondance entre la valeur de cette variation de force  $\Delta F$  et une variation  $\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}}$  de la déformation uniaxiale de toute fibre

alignée entre les deux points d'ancrage 121 et 125 de ce corps d'épreuve.

Dans cet exemple, la fibre optique 110 à réseau de Bragg 124 est précontrainte en traction entre les deux points  
5 d'ancrage 121 et 125 du corps d'épreuve 123.

Ainsi, lorsqu'une action est exercée sur ce corps d'épreuve 123, ce dernier se déforme en entraînant une variation  $\Delta L_{ce}$  de la distance entre les deux points d'ancrage 121 et 125 qui peut être mesurée au moyen de la variation  $\Delta \lambda_B$  de la  
10 longueur d'onde réfléchie par la fibre optique 110 à réseau de Bragg 124.

En d'autres termes, les variations  $\Delta L_{ce}$  de la longueur  $L_{ce}$  du corps d'épreuve sont mesurées par les variations  $\Delta \lambda_B$  de la longueur d'onde  $\lambda_B$  de Bragg réfléchie par le réseau de Bragg  
15 124 inscrit dans la fibre optique 110.

Un dispositif de mesure muni d'une fibre optique à réseau de Bragg présente de nombreux avantages. Par exemple, il permet de placer le système d'analyse spectrale en charge de la mesure de la longueur d'onde de Bragg à distance  
20 du point de mesure grâce à la faible atténuation spectrale de la fibre optique vis-à-vis du rayonnement transmis.

Un tel éloignement est avantageux lorsque, par exemple, la mesure est effectuée dans un milieu hostile (température et/ou humidité élevée(s)) ou difficilement  
25 accessible pour les moyens de traitement du signal.

D'autres avantages résident dans le fait que la fibre optique est insensible aux perturbations électromagnétiques extérieures ou qu'elle présente un comportement linéaire en déformations, qu'elle permet d'obtenir une bonne résolution et

qu'elle est insensible au vieillissement des composants d'extrémités (sources laser ou connectique par exemple), le principe de mesure reposant sur une mesure spectrale, à savoir la longueur d'onde de Bragg caractéristique du réseau.

5

## **II. Le problème résolu par l'invention**

Toutefois, dans certains cas, la sensibilité de mesure  
10 d'un dispositif classique à fibre optique à réseau de Bragg est insuffisante pour avoir une résolution de mesure suffisante vis-à-vis d'une température et/ou d'une force, et plus généralement, d'une déformation.

Par exemple, on peut désirer mesurer la force de  
15 contact entre un pantographe et son fil caténaire de façon à minimiser cette force et réduire l'usure de ses éléments.

Une telle mesure s'effectue en détectant les déformations du pantographe lors de son action sur le fil caténaire de telle sorte que, connaissant le comportement  
20 thermomécanique du pantographe, on puisse calculer les efforts verticaux appliqués entre autres par le fil caténaire sur ce pantographe.

Dans ce cas, la sensibilité de mesure ou de détection d'une fibre optique à réseau de Bragg utilisée de façon classique  
25 comme dans l'art antérieur, est insuffisante.

Un pantographe est en effet dans son ensemble dimensionné pour présenter une forte rigidité et des déformations très limitées. Ainsi, dans un premier exemple, une variation de 1 N de la force verticale appliquée sur le patin de

carbone induit, par flexion trois points, une variation de déformation longitudinale de l'ordre de  $5 \times 10^{-5}$  pour cent, cette force de contact pouvant évoluer dans une plage de variation allant jusqu'à 500 N.

5                   En d'autres termes, la résolution absolue de déformation requise par le dispositif de mesure pour résoudre une variation de force de contact de 1 N est de l'ordre de  $5 \times 10^{-5}$  pour cent.

10                   Une telle résolution ne peut pas être fournie par des jauges de déformations électriques résistives car le signal de mesure fourni par ces jauges est perturbé du fait des champs électromagnétiques générés par le fil caténaire.

15                   Selon d'autres exemples, les variations de déformations à mesurer de structures conçues pour ne pas varier, telles que des bâtiments, des ponts ou des barrages, peuvent aussi être trop faibles pour pouvoir être mesurées de façon satisfaisante avec un dispositif classique muni d'une fibre optique à réseau de Bragg.

20

### **III. L'invention**

25                   La présente invention résout le problème précédemment mentionné en proposant un dispositif, un système et un procédé dont la sensibilité de mesure est supérieure à celles des dispositifs, systèmes ou procédés usuels à fibre optique à réseau de Bragg.

                    L'invention résulte de la constatation qu'une fibre optique a une limite de déformation longitudinale à la rupture supérieure à la limite de déformation longitudinale élastique des

matériaux généralement utilisés pour former un corps d'épreuve, et en particulier des métaux, comme cela est montré sur la figure 2.

Sur cette figure 2 est représentée, selon un axe des abscisses 200, la déformation longitudinale  $\varepsilon$  d'une fibre optique à matrice en silice  $\text{SiO}_2$  (courbe 202) et la déformation de métaux pendant un essai de traction et de compression standard, à savoir des aciers (courbe 204) et des aciers à haute limite élastique, encore appelés aciers HLE (courbe 206), en fonction de la contrainte  $\sigma$  (axe des ordonnées 208) à laquelle est soumis chaque matériau.

On constate alors que le domaine de déformations d'une fibre optique silice (courbe 202) présente une limite de déformation à rupture en traction de l'ordre de 5 pour cent, nettement supérieure à la limite de déformation élastique des métaux, de l'ordre de 0,2 pour cent.

L'invention résulte aussi de la constatation que, comme montré ultérieurement, le signal mesuré par le déplacement relatif  $\Delta\lambda_B/\lambda_B$  de la longueur d'onde caractéristique d'un réseau de Bragg varie proportionnellement à la variation relative  $\Delta L/L$  de la distance  $L$  entre les deux points d'ancrage au corps d'épreuve du tronçon de la fibre optique portant le réseau de Bragg utilisé pour effectuer les mesures. Conformément à l'usage, une telle variation relative sera appelée « déformation » dans ce qui suit.

Or, dans le quotient  $\Delta L/L$ , on constate que seule la variation  $\Delta L$  de la longueur  $L$  du tronçon de la fibre optique utilisé pour effectuer des mesures, c'est-à-dire compris entre

deux points d'attaches du corps d'épreuve, est liée à la grandeur à mesurer.

En d'autres termes, on peut modifier la longueur  $L$  du tronçon de fibre optique à réseau de Bragg sollicité pour effectuer les mesures de déformations pour que cette longueur soit inférieure à la longueur du corps de mesure  $L_{ce}$  d'un facteur  $K$ . Dans ce cas, on augmente le déplacement relatif  $\Delta\lambda_B/\lambda_B$  de la longueur d'onde caractéristique d'un réseau de Bragg de ce facteur  $K$ , facilitant ainsi la mesure de cette variation.

C'est pourquoi, l'invention concerne un dispositif de mesure de déformations uniaxiales comprenant un tronçon de fibre optique muni d'au moins un réseau de Bragg aligné selon la direction de l'axe de mesure, et un corps d'épreuve soumis aux déformations à mesurer et les transmettant au tronçon de fibre optique, des moyens pour envoyer dans la fibre une onde lumineuse comportant les longueurs d'onde de Bragg que peuvent atteindre tous les réseaux de Bragg inscrits sur cette fibre et des moyens de lecture de la longueur d'onde de Bragg de chacun de ces réseaux, caractérisé en ce que :

- les points de fixation aptes à soumettre ce tronçon de fibre à une précontrainte négative, positive ou nulle, et à lui transmettre les élongations du corps d'épreuve, sont séparés par une distance ( $L_{fib}$ ) présentant une variation ( $\Delta L_{fib}$ ) lorsque le corps d'épreuve est sollicité par la déformation à mesurer,

- la longueur effective ( $L_{ce}$ ) du corps d'épreuve présente une élongation ( $\Delta L_{ce}$ ), lorsque le corps d'épreuve est sollicité par la déformation à mesurer,

- la longueur ( $L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique et la longueur effective ( $L_{\text{ce}}$ ) du corps de mesure sont telles que la déformation longitudinale ( $\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de la fibre optique est strictement supérieure à la déformation ( $\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}}$ ) du corps d'épreuve qui en est à l'origine, définissant ainsi un coefficient d'amplification  $K$  strictement supérieur à 1, et égal au premier ordre au quotient  $(\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}}) / (\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}})$ .

Pour des déformations uniaxiales de grande amplitude, c'est-à-dire au delà de 5 pour cent, comme celles par exemple qu'il est possible d'obtenir avec une fibre plastique, il faut également prendre en compte les termes au-delà du premier ordre, et la définition de  $K$  devient :

$$\ln[1+(\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}})] / \ln[1+(\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}})]$$

15

Entre la partie du corps d'épreuve délimitée par la longueur effective  $L_{\text{ce}}$  et soumise à la déformation uniaxiale à mesurer, et les points d'accrochage de la fibre espacés de  $L_{\text{fib}}$ , il existe, à au moins une des extrémités du tronçon de fibre optique, un élément mécanique qui n'est pas soumis à la même déformation mais transmet à la fibre l'élongation correspondante. Cet élément mécanique, peut faire partie intégrante du corps d'épreuve ou constituer un élément distinct de ce corps d'épreuve. Il a généralement une forme en saillie.

25

Ainsi, préférentiellement la longueur ( $L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique est inférieure à la longueur ( $L_{\text{ce}}$ ) du corps d'épreuve.

Il convient de noter que l'amplification, par le coefficient  $K$ , du signal de mesure peut être obtenue lorsque la

variation  $\Delta L_{\text{fib}}$  de la longueur  $L_{\text{fib}}$  de la fibre utilisée pour la mesure est distincte de la variation  $\Delta L_{\text{ce}}$  du corps d'épreuve. Toutefois, selon la réalisation préférentielle de l'invention, la variation de longueur ( $\Delta L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique est égale à la variation de longueur ( $\Delta L_{\text{ce}}$ ) du corps d'épreuve.

De fait, l'invention permet une augmentation de la résolution des mesures effectuées tant que la déformation mécanique du corps d'épreuve  $\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}}$  est inférieure à la déformation mécanique  $\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}}$ , du tronçon de la fibre optique à réseau de Bragg utilisé pour effectuer des mesures de déformations.

A titre d'exemple, pour un facteur  $K$  égal à trois ( $\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}} = 3 (\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}})$ ), la dynamique du signal mesuré  $\Delta \lambda_B/\lambda_B$ , c'est-à-dire la plage de valeurs mesurées, devient trois fois plus étendue, ce qui entraîne que la sensibilité du dispositif est multipliée par ce facteur  $K$ .

La valeur  $K$  est strictement supérieure à 1 et sa valeur supérieure n'est limitée que par des contraintes annexes, par exemple liées aux matériaux sollicités.

Ce coefficient  $K$  est aussi limité par le fait que la longueur  $L_{\text{fib}}$  ne doit en aucun cas être inférieure à la longueur du réseau de Bragg, ou s'il y a plusieurs réseaux de Bragg mesurant la déformation du corps d'épreuve, de la plus petite distance mesurée le long de la fibre optique qui comporte tous ces réseaux de Bragg.

Enfin, ce coefficient  $K$  est aussi limité par le fait que le seuil de rupture de la fibre optique ne doit pas être atteint.

Le dispositif de mesure de déformations selon l'invention permet aussi de réaliser des mesures de forces ou de

contraintes mécaniques. Il suffit pour cela de lui associer des moyens aptes à transformer ces forces ou ces contraintes mécaniques en une déformation uniaxiale mesurée par le dispositif conforme à l'invention. Dans ce cas, les contraintes annexes limitant la valeur supérieure de  $K$  peuvent résulter de la limitation des erreurs induites par la dilatation thermique des pièces mécaniques dont les dimensions et les propriétés thermomécaniques déterminent  $K$ .

Il a été précisé qu'entre la partie du corps d'épreuve délimitée par la longueur effective  $L_{ce}$ , et les points d'accrochage de la fibre espacés de  $L_{fib}$ , il existait au moins un élément mécanique qui n'est pas soumis à la même déformation que le corps d'épreuve mais transmet à la fibre l'élongation correspondante. Dans le cas des mesures de forces ou de contraintes mécaniques, chacun de ces éléments mécaniques n'est, par construction, soumis à aucune des déformations engendrées par les forces ou contraintes mécaniques à mesurer.

Le dispositif de mesure de déformations selon l'invention permet aussi de réaliser des mesures de températures. Il suffit pour cela de lui associer des moyens aptes à transformer ces températures en une déformation uniaxiale mesurée par le dispositif conforme à l'invention.

Dans ce cas, chaque élément mécanique qui n'est pas soumis à la même déformation que le corps d'épreuve, mais transmet à la fibre l'élongation correspondante, n'est pas soumis aux mêmes déformations que le corps d'épreuve sur sa longueur effective ( $L_{ce}$ ) parce qu'il est distinct du corps d'épreuve, réalisé dans un matériau n'ayant pas nécessairement

le même coefficient de dilatation, et qu'en conséquence il n'est pas nécessairement soumis à la même expansion thermique.

Le dispositif de mesure de déformations selon l'invention permet aussi de réaliser des mesures de couple. Il suffit pour cela de lui associer des moyens aptes à transformer ces couples en une différence de déformation de deux réseaux de Bragg mesurant chacun une déformation uniaxiale, et agencés de manière adéquate pour que cette différence soit liée au couple à mesurer. Cet exemple sera détaillé ultérieurement lors de la description d'exemples de réalisation de l'invention. Les contraintes de ce type de réalisation sont les mêmes que celles liées à la mesure de forces et contraintes mécaniques, auxquelles s'ajoutent les contraintes connues des mesures différentielles, comme par exemple l'importance d'associer deux éléments aussi semblables que possibles.

Il est important de souligner que le principe de l'invention, qui vise à amplifier les déformations subies par un corps d'épreuve au niveau du réseau de Bragg d'une fibre optique, est contraire à l'usage habituel selon lequel on tend à limiter les sollicitations du matériau déformable formant le corps d'épreuve afin de préserver ses propriétés métrologiques et sa durée de vie.

On ne sortirait pas du cadre de l'invention en associant à chaque corps d'épreuve plusieurs tronçons en parallèle d'une ou de plusieurs fibres optiques, portant chacun au moins un réseau de Bragg et conformes à l'invention ci-dessus.

La fixation des fibres aux extrémités peut par exemple se faire par soudure, collage, enroulement autour d'un

cabestan. Toutefois l'invention sollicite plus fortement la fibre optique que dans les dispositifs de mesure de l'art antérieur. Ainsi l'invention peut générer des gradients de déformation très élevés aux encastresments de la portion de fibre sollicitée, ce qui  
5 peut conduire à des endommagements voire une rupture de la fibre.

Pour éviter cela, la réalisation préférentielle de l'invention recourt, à chaque extrémité de la fibre, à un dispositif de fixation de cette fibre distinct du corps d'épreuve,  
10 et constituant une sorte de mandrin spécifique à la fibre optique considérée.

Ces sortes de mandrin comportent au moins trois mors répartis autour d'un axe principal confondu avec l'axe de la fibre, chaque mors comprenant une surface intérieure  
15 constituée d'une portion centrale et de deux portions d'extrémité, les portions d'extrémité étant réalisées de manière à prolonger la portion centrale en s'écartant progressivement de l'axe principal du dispositif, et comportant chacune au moins une partie en contact avec la gaine mécaniquement déformable  
20 de la fibre optique lorsque le mors occupe une position de serrage.

De manière préférentielle, le diamètre laissé libre par les mors serrés au maximum est un peu supérieur au diamètre du seul coeur de la fibre. Ainsi, lors du serrage, ce coeur étant  
25 beaucoup plus dur que la gaine mécanique de la fibre, c'est essentiellement cette dernière qui se trouve déformée.

Selon une autre variante de l'invention, on utilise une fibre optique à réseau de Bragg dite à saut de phase, telle que décrite dans la thèse de doctorat de l'Université de Paris-Sud,

Centre d'Orsay, soutenue le 24 novembre 1999 par M. Christophe Martinez, et intitulée « Etude et réalisation de composants à réseaux de Bragg dans les fibres optiques », qui présente une largeur spectrale typique à mi-hauteur de son pic central de 25 pm à comparer aux 300 pm d'un réseau de Bragg standard, ce qui permet d'améliorer la résolution de mesure du dispositif.

Plus précisément, un tel dispositif comporte au moins un réseau de Bragg à saut de phase, et est associé pour la lecture de sa longueur d'onde de Bragg  $\lambda_{\text{Bsaut}}$  à un second réseau de Bragg apodisé dont la bande de filtrage inclut toutes les longueurs d'onde de Bragg  $\lambda_{\text{Bsaut}}$  que peut prendre le réseau à saut de phase dans toute son étendue de mesure.

Selon une autre variante, on utilise une fibre optique microstructurée, aussi appelée fibre à cristaux photoniques, dont la structure présente, longitudinalement à son axe optique, des trous répartis dans la section de la fibre, espacés les uns des autres et pouvant être soit vides, soit remplis d'un matériau pouvant conférer à cette fibre optique un indice effectif plus grand qu'en l'absence de cette microstructure. Il est alors possible d'inscrire un réseau de Bragg dans cette fibre, lorsque par exemple son coeur optique est dopé en germanium  $\text{GeO}_2$ , selon les méthodes habituellement connues, à une longueur d'onde caractéristique  $\lambda_B$ .

L'avantage procuré par l'augmentation de l'indice effectif apporté par cette microstructure, pouvant être de quelques pour cent permettant de faire passer l'indice effectif de la fibre d'une valeur de 1,46 à 1,50 par exemple, permet alors d'augmenter la sensibilité à toute influence des paramètres

extérieurs du réseau de Bragg ainsi inscrit d'un même ordre de grandeur.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront avec la description effectuée ci-dessous au moyen  
5 des figures ci-jointes sur lesquelles :

- les figures 1a et 1b, déjà décrites, représentent une fibre optique et son utilisation antérieure connue dans un capteur de force,
- la figure 2, déjà décrite, est un graphique  
10 représentant les courbes de déformations longitudinales élastiques pour différents matériaux,
- la figure 3 est un schéma d'un premier dispositif de mesure conforme à l'invention, conçu pour mesurer des forces,
- 15 - la figure 4 est un schéma d'un second dispositif de mesure conforme à l'invention,
- la figure 5 représente une utilisation d'un capteur conforme à l'invention pour la mesure de la force exercée sur un pantographe, entre autres par sa ligne caténaire,
- 20 - la figure 5a représente la surface 3D de la fonction  $t=f(u,v)$  de la variation de déformations mécaniques de la fibre optique  $t=\Delta\varepsilon_{\text{fib}}$  en fonction du facteur d'amplification  $K=u$  et de la variation de déformation mécanique du corps d'épreuve  $v=\Delta\varepsilon_{\text{ce}}$  pour un ensemble de couples  $\{u,v\}$  admissibles pour une  
25 application du capteur dans un pantographe,
- la figure 5b représente les courbes d'iso-déformations mécaniques de la surface représentée par la courbe 5a pour un ensemble de couples  $\{u,v\}$  admissibles pour une application du capteur dans un pantographe,

- la figure 6a représente schématiquement un système de mesure de force comprenant une pluralité de capteurs conformes à l'invention,
- la figure 6b représente schématiquement un  
5 dispositif de mesure de force comprenant une pluralité de fibres optiques alignées selon un même axe dont les réseaux de Bragg dédiés à la mesure des déformations mécaniques sont dans un même plan, conforme à l'invention et permettant en outre la mesure de couple,
- 10 - la figure 6c représente schématiquement un dispositif de mesure de température à un seul réseau de Bragg maintenu précontraint et solidaire du corps d'épreuve,
- la figure 6d représente schématiquement un  
15 dispositif de mesure destiné préférentiellement à la mesure de déformations d'origine mécanique, dont le réseau de Bragg destiné à la compensation des effets thermiques est maintenu en précontrainte et solidaire du corps d'épreuve,
- la figure 6e représente schématiquement un  
20 dispositif de mesure destiné préférentiellement à la mesure de déformations dont le réseau de Bragg destiné à la mesure des déformations d'origine mécanique est maintenu dans une gaine empêchant son flambage,
- la figure 7a représente schématiquement une  
25 coupe transversale du mandrin spécifique permettant, selon une variante préférentielle, de fixer les extrémités du tronçon de fibre optique soumis à la déformation à mesurer,
- la figure 7b représente schématiquement une coupe axiale selon le plan III - III du mandrin spécifique de la figure 7a, et

- les figures 8a, 8b et 8c représentent divers profils de fond de rainure utilisables dans l'invention pour bloquer mécaniquement la fibre optique dans son dispositif de maintien.

5 Un premier mode de réalisation est décrit ci-dessous à l'aide la figure 3 qui représente un dispositif 300 de mesure de forces conforme à l'invention.

Pour déterminer la force appliquée sur le corps d'épreuve 302 de ce dispositif, on mesure la déformation  
10 longitudinale  $\Delta\varepsilon_{ce}$  de ce dernier au moyen d'une fibre optique 304 à réseau de Bragg 306.

Connaissant les propriétés thermomécaniques du corps d'épreuve, il est possible de déterminer la variation de contrainte  $\Delta\sigma$  exercée sur le dispositif à partir de la mesure de  
15 sa déformation longitudinale  $\Delta\varepsilon_{ce}$  obéissant, en mode élastique, à la loi de Hooke :

$$\Delta\sigma = E \cdot \Delta\varepsilon_{ce}$$

20 où E est le module d'Young du matériau utilisé pour le corps d'épreuve. Connaissant la section S de ce corps d'épreuve à l'endroit où est mesurée la déformation longitudinale  $\Delta\varepsilon_{ce}$ , la variation de force  $\Delta F$  exercée sur celui-ci se déduit selon la relation :

25

$$\Delta F = \Delta\sigma \cdot S$$

En pratique, la section S de ce corps d'épreuve n'est pas nécessairement constante. Il suffit que la force ou la

contrainte uniaxiale, orientée selon la direction du tronçon de fibre sollicité, s'applique sur un tronçon de ce corps d'épreuve compris entre deux sections planes S1 et S2 normales à l'axe de mesure, continues ou discontinues, et définies comme suit :

- 5                   - elles sont en regard l'une de l'autre de manière à ce que l'application de la force ou de la contrainte n'induisse aucun moment de rotation sur le corps d'épreuve,
- ces sections servent d'appuis aux dispositifs de fixation du tronçon de fibre, et lui imposent son élongation,
- 10                  - le tronçon compris entre S1 et S2 se déforme en tout point de manière élastique sans jamais atteindre le domaine de déformations plastiques.

Dans ce qui suit on appelle  $L_{ce}$  la distance entre ces deux sections planes S1 et S2 orthogonales à la direction du tronçon de fibre sollicité. Elle constitue fonctionnellement la longueur effective de ce corps d'épreuve.

Par ailleurs, il convient de noter que la déformation longitudinale  $\Delta\varepsilon_{ce}$  mesurée est uniaxiale, c'est-à-dire qu'elle s'effectue selon un seul axe correspondant sensiblement à l'axe de la fibre optique 304. Ce dispositif est donc particulièrement intéressant pour mesurer des déformations ou efforts uniaxiaux.

La déformation longitudinale infinitésimale  $d\varepsilon_{ce}$  de la longueur effective du corps d'épreuve peut alors être définie par la relation :

25

$$d\varepsilon_{ce} = dL_{ce}/L_{ce} \quad (3)$$

où  $dL_{ce}$  représente la variation infinitésimale de la longueur effective du corps d'épreuve et  $L_{ce}$  la longueur effective du corps d'épreuve en cours d'élongation.

En intégrant la relation (3), on obtient :

5

$$\Delta\varepsilon_{ce} = \ln[1+(\Delta L_{ce}/L_{0ce})] \quad (4)$$

où  $\Delta L_{ce}$  représente la somme des variations de longueur infinitésimales du corps d'épreuve  $dL_{ce}$ ,  $L_{0ce}$  la longueur effective du corps d'épreuve avant élongation,  $\Delta\varepsilon_{ce}$  la somme des variations de déformations longitudinales infinitésimales  $d\varepsilon_{ce}$  du corps d'épreuve correspondant à l'élongation  $\Delta L_{ce}$ ,  $\ln$  étant le logarithme népérien de base  $e \sim 2.71828182846$  tel que  $\ln(e)=1$ .

De façon analogue, la déformation longitudinale infinitésimale  $d\varepsilon_{fib}$  du tronçon de fibre optique à réseau de Bragg utilisé pour mesurer des déformations peut être définie par la relation :

20

$$d\varepsilon_{fib} = dL_{fib}/L_{fib} \quad (5)$$

où  $dL_{fib}$  représente la variation infinitésimale de la longueur effective du corps d'épreuve,  $L_{fib}$  la longueur effective du corps d'épreuve en cours d'élongation.

En intégrant la relation (5), on obtient :

25

$$\Delta\varepsilon_{fib} = \ln[1+(\Delta L_{fib}/L_{0fib})] = \ln[(1+\xi \cdot (\Delta L_{ce}/L_{0fib}))]$$

où  $L_{0fib}$  est la longueur de base initiale de la fibre optique et  $\xi$  est un coefficient pratiquement égal à 1.

Cette nouvelle relation (6) peut aussi s'écrire de façon à faire apparaître un facteur K égal au quotient de la longueur initiale  $L_{0ce}$  du corps d'épreuve par la longueur initiale  $L_{0fib}$  de la fibre optique, ce quotient étant multiplié par le coefficient  $\xi$  ( $K = \xi(L_{0ce}/L_{0fib})$ ) :

$$\Delta\varepsilon_{fib} = \ln[1 + \xi(L_{0ce}/L_{0fib})(\Delta L_{ce}/L_{0ce})] = \ln[1 + K.(\Delta L_{ce}/L_{0ce})] \quad (7)$$

10 Finalement, en supposant que la déformation longitudinale  $\Delta\varepsilon_{ce}$  du corps d'épreuve est sensiblement inférieure à 1, on peut effectuer un développement en série à l'ordre 1 de l'expression (7) pour obtenir la relation (8) suivante :

$$\Delta\varepsilon_{fib} = K.\Delta\varepsilon_{ce} + o(K.\Delta\varepsilon_{ce}) \quad (8)$$

15

Ainsi, la déformation mesurée par la fibre optique à réseau de Bragg 304 est amplifiée, au premier ordre, d'un facteur K égal au quotient de la déformation  $\Delta\varepsilon_{fib}$  du tronçon de la fibre optique 304 utilisé pour effectuer les mesures, par la déformation  $\Delta\varepsilon_{ce}$  du corps d'épreuve 302.

20

En choisissant un rapport K adapté, on peut ainsi amplifier de ce facteur K les déformations du corps d'épreuve 302 mesurées par la fibre optique 304 afin d'obtenir une résolution de mesure améliorée.

25

D'une façon générale, un dispositif selon l'invention aura un facteur d'amplification d'autant plus grand que les conditions ci-dessous sont vérifiées :

- le produit du module d'Young du matériau constituant le corps d'épreuve par la plus petite section soumise

à déformation est le plus faible possible, sans toutefois permettre à ce corps d'épreuve de se déformer en un quelconque de ses points de façon plastique,

- la longueur effective du corps d'épreuve  $L_{0ce}$  est la plus grande possible pour une longueur donnée du tronçon de fibre  $L_{0fib}$ .

En outre, s'il est naturel pour l'homme du métier de concevoir un corps d'épreuve de section constante, l'invention permet aussi d'utiliser des corps d'épreuve de sections variables dès lors que son comportement en tout point compris entre les sections S1 et S2 reste dans le domaine élastique sans jamais atteindre le domaine de déformations plastiques.

Pour obtenir un rapport K supérieur à un, le dispositif 300 comprend deux éléments saillants 310, orientés l'un vers l'autre, fixant la fibre optique 304 à une première extrémité 312 et à une seconde extrémité 314 telles que la longueur au repos  $L_{0fib}$  du tronçon de la fibre optique soumise à des élongations est inférieure à la longueur effective au repos  $L_{0ce}$  du corps d'épreuve provoquant ces élongations.

Il convient de signaler qu'un dispositif de mesure tel que décrit à la figure 3 présente l'avantage, par rapport à une jauge de déformation fixée sur un corps d'épreuve, de permettre l'utilisation d'éléments saillants, ou saillies 310 réduisant la longueur de la fibre optique soumise à des élongations.

Dans cette réalisation préférée, ces éléments saillants sont indéformables vis-à-vis des actions extérieures à mesurer auxquelles est soumis le corps d'épreuve ce qui permet, notamment, de fixer le rapport K de façon

indépendante des propriétés des matériaux composants ces saillies.

L'indice effectif  $n_e$  et le pas  $\Lambda$  du réseau de Bragg 306 sont dépendants de la température. De façon à compenser les effets de la température sur la mesure spectrale, on utilise un deuxième réseau de Bragg 316, qui est placé à la même température que le premier réseau de Bragg 306, dont les variations de déformations ne sont dues qu'à la dilatation thermique induite par des variations de température.

En d'autres termes, ce deuxième réseau de Bragg 316 n'est pas sensible aux déformations d'origine mécanique du corps d'épreuve de telle sorte que, à partir de la connaissance de la mesure spectrale de sa longueur d'onde de Bragg caractéristique, on peut corriger les mesures spectrales du premier réseau de Bragg 306 de façon à compenser les effets de la température sur l'indice effectif  $n_e$  et le pas du réseau  $\Lambda$ .

Selon une variante, représentée à la figure 4, un dispositif 400 de mesure de forces comprend des moyens 402, tels que des conduits de ventilation, destinés à homogénéiser la température au sein du dispositif, et notamment entre le réseau de Bragg 404 destiné à la mesure de la force et le second réseau de Bragg 406 destiné à la compensation des effets thermiques du premier réseau de Bragg.

Il est important de remarquer que les figures 3 et 4 montrent des corps d'épreuve de formes diverses, et notamment ne présentant pas une section constante sur leur longueur d'élongation.

Par ailleurs, comme indiqué antérieurement, il convient de choisir un rapport  $K$  d'amplification tel que la

déformation de la fibre optique n'atteigne pas sa limite de rupture.

A cet effet, on rappelle qu'une fibre optique à matrice en silice  $\text{SiO}_2$  présente une limite élastique en déformations longitudinales de l'ordre de cinq pour cent en traction et au moins de quinze pour cent en compression comme le précise l'article de G.A. Ball et W.W. Morey paru le 1er décembre 1994 dans la revue « Optics Letters », volume 19, n°23 et intitulé « Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser ».

Par ailleurs, une fibre optique en plastique présente une limite élastique en déformations longitudinales en traction généralement supérieure avec une limite de rupture en traction pouvant couramment dépasser cent pour cent. Une telle élasticité est due au phénomène de durcissement structural de la matrice polymère provoqué par l'orientation préférentielle dans la direction d'application de la force des chaînes macromoléculaires du polymère.

Comme décrit précédemment à l'aide de la figure 2 ces valeurs sont nettement supérieures à celles d'un composé, tel qu'un métal, une céramique ou un matériau piezo-électrique pouvant former le corps d'épreuve, dont les déformations doivent rester dans le domaine élastique pour ne pas présenter d'erreur de mesure.

Typiquement, cette limite élastique en déformation uniaxiale est de l'ordre de 0,2 pour cent pour un acier standard, et de 0,35 pour cent pour un acier à haute limite élastique. Dans l'exemple particulier d'un corps d'épreuve réalisé dans un acier dont la limite élastique est proche de 0,2 pour cent, et

muni d'une fibre optique à matrice en silice  $\text{SiO}_2$  dans laquelle est inscrit un réseau de Bragg, il est possible d'atteindre un facteur d'amplification  $K$  supérieur à 25 ( $K \geq 5/0,2$ ) pour une utilisation de la fibre optique uniquement en traction, et  
5 supérieur à 100 ( $K \geq (5+15)/0,2$ ) si cette fibre est utilisée en compression.

Etant donnée la faculté d'une fibre optique plastique à pouvoir s'allonger encore plus, ce facteur  $K$  d'amplification peut être encore plus grand dans le cas de l'utilisation d'une  
10 fibre optique plastique.

Par ailleurs, lorsque le corps d'épreuve est constitué d'un matériau ne présentant que de très faibles déformations, l'invention permet d'amplifier ces dernières pour effectuer leur mesure.

15 Tel est le cas, dans ce second exemple, des supports d'archet d'un pantographe dont les déformations longitudinales induites par les efforts verticaux exercés sur lui, notamment, par le fil caténaire, sont de l'ordre de  $10^{-4}$  pour cent, c'est-à-dire un allongement de un micromètre pour une longueur de un  
20 mètre, alors que leur limite de déformation élastique est de l'ordre de 0,2 pour cent.

Selon un autre exemple, cette amplification peut être utilisée sur une cellule de force utilisée avec un dispositif de tests rhéologiques, en traction et/ou compression, sur un  
25 matériau dont l'étendue de mesure et la résolution peuvent être amplifiées avec l'avantage d'une mesure unidirectionnelle indépendante des effets de contraction transverses de Poisson.

L'invention permettant d'augmenter la sensibilité de la mesure, elle convient particulièrement dans les cas où le

corps d'épreuve ne peut présenter des déformations de l'ampleur habituellement utilisée en extensométrie, par exemple lorsqu'il est nécessaire d'introduire le moins possible de plasticité ou de fragilité.

5                    Dès lors, on peut fixer une fibre optique à réseau de Bragg en deux points d'un corps d'épreuve, de telle sorte que les variations de déformations de ce corps d'épreuve soient transmises de façon amplifiée vis-à-vis de la fibre optique à réseau de Bragg, le facteur d'amplification  $K$  étant choisi de telle  
10 sorte que la limite de rupture de la fibre optique ne soit pas atteinte.

                    Un dispositif conforme à l'invention présente une résolution de mesure accrue par rapport à un dispositif connu puisque les déformations longitudinales relatives de la portion  
15 de fibre optique située entre ces deux éléments sont, pour des élongations identiques du corps de mesure, plus amples qu'avec un dispositif classique.

                    En d'autres termes, le capteur doit être dimensionné pour que la déformation subie par la fibre optique à réseau de  
20 Bragg soit inférieure à son seuil de tolérance, c'est-à-dire inférieure au niveau maximal de déformations admissible dont la valeur dépend de la durée de vie souhaitée du dispositif.

                    Pour définir cette valeur, on peut utiliser les conditions de Weibull, par exemple décrites dans l'article de  
25 M. Jean Phalippou intitulé « Verres, Propriétés et applications », AF 3 601, Traité « Sciences fondamentales », Techniques de l'Ingénieur, 249, Rue de Crimée, F-75925 Paris Cedex 19.

                    Le dimensionnement et le choix des éléments formant le dispositif 300 peut aussi prendre en compte la

relation entre la variation de force  $\Delta F$  appliquée sur le corps d'épreuve et la variation de déformation mécanique  $\Delta\varepsilon_{\text{fib}}$  de la fibre optique.

A cet effet, on peut considérer, par exemple pour un tube corps d'épreuve de géométrie cylindrique, que la variation de déformation mécanique  $\Delta\varepsilon_{\text{fib}}$  de la fibre optique est mesurée par une relation du type :

$$\Delta\varepsilon_{\text{fib}} = \ln[1 + \xi(L_{0ce}/L_{0fib}) \cdot (\exp(\Delta F / (\pi \cdot E_t \cdot (\Phi_{0t} - e_{0t}) \cdot e_{0t})) - 1)] \quad (9)$$

10

où  $\Delta F$  est la variation de force extérieure appliquée sur le corps d'épreuve,  $E_t$  le module d'Young du tube corps d'épreuve,  $\Phi_{0t}$  le diamètre extérieur du tube utilisé pour le corps d'épreuve,  $e_{0t}$  l'épaisseur de ce tube et  $\xi$  une constante considérée comme égale à un par la suite.

15

La relation (9) peut être considérée comme une fonction  $f(u,v)$  de deux variables  $u$  et  $v$  telles que :

$$t = f(u,v) \quad (10)$$

qui peut s'étudier mathématiquement en considérant les paramètres  $t$ ,  $u$ ,  $v$  et  $j$  définis suivant les relations :

20

$$t = \Delta\varepsilon_{\text{fib}}, \quad u = \xi \cdot (L_{0ce}/L_{0fib}) = K, \quad v = \Delta F / [E_t \cdot (\Phi_{0t} - e_{0t}) \cdot e_{0t}]$$

et  $j$  qui représente un jeu entre le corps d'épreuve et le dispositif de maintien de la fibre permettant son assemblage.

Une telle étude a été effectuée sur le domaine de définition  $Df_{\{u,v\}}$  de la fonction  $f$ , c'est-à-dire le domaine des valeurs admissibles pour  $u$  et  $v$  :

25

$$Df_{\{u,v\}} = \left[ \frac{\min(L_{0ce})}{\max(L_{0fib})}, \frac{\max(L_{0ce})}{\min(L_{0fib})} \right] \times \left[ \frac{4 \min(\Delta F)}{\max(E_t) [\max^2(\phi_{0t}) - 4 \min^2(j)]}, \frac{\max(\Delta F)}{\min(E_t) [\min(\phi_{0t}) - \min(e_{0t})] \min(e_{0t})} \right] \quad (11)$$

En considérant les valeurs indiquées dans les tableaux 1 et 2 à la fin de la présente description, l'étude de cette fonction a permis déterminer les conditions optimales  $\{u, v\}_{opt}$  pour lesquelles la déformation longitudinale de la fibre optique  $\Delta\varepsilon_{fib}$  est maximale, traduisant les conditions d'amplification maximale de la déformation mécanique du corps d'épreuve, à savoir :

$$\{u, v\}_{opt} = \left\{ \frac{\max(L_{0ce})}{\min(L_{0fib})}, \frac{\max(\Delta F)}{\min(E_t)[\min(\phi_{0t}) - \min(e_{0t})]\min(e_{0t})} \right\} \quad (12)$$

Le maximum des déformations mécaniques longitudinales de la fibre optique est alors obtenu pour des conditions telles que :

$$\max(\Delta\varepsilon_{fib}) = \ln \left[ 1 + \frac{\max(L_{0ce})}{\min(L_{0fib})} \cdot \left( \exp \left[ \frac{\max(\Delta F)}{\pi \min(E_t)[\min(\phi_{0t}) - \min(e_{0t})]\min(e_{0t})} \right] - 1 \right) \right] \quad (13)$$

Le résultat numérique de l'étude de cette fonction est représenté sur la figure 5a en fonction de  $u=K$  (axe 500), de  $v$  (axe 502) et de la valeur de la déformation mécanique  $\Delta\varepsilon_{fib}$  obtenue.

La relation (13) permet de définir, parmi les matériaux candidats à l'application spécifique donnée, des conditions optimales d'amplification des déformations longitudinales d'une fibre optique à réseaux de Bragg conformément à l'invention, à savoir :

- un tube corps d'épreuve de module d'Young  $E_t$  le plus petit possible,
- une longueur effective du tube corps d'épreuve  $L_{0ce}$  la plus grande possible,

- un diamètre extérieur de tube corps d'épreuve  $\Phi_{0t}$  le plus petit possible,
- une épaisseur de tube corps d'épreuve  $e_{0t}$  la plus petite possible.

5 Par ailleurs, les fonctions précédemment indiquées permettent de déterminer l'ensemble des couples  $\{u,v\}$  permettant d'obtenir une déformation de fibre optique  $\Delta\varepsilon_{fib}$ , donnée pour un facteur d'amplification  $K$  donné, comme montré sur la figure 5b qui est un exemple de courbes d'iso-  
10 déformations mécaniques.

Les longueurs  $L_{0g}$  et  $L_{0d}$  des deux éléments saillants 310 de fixation de la fibre optique,  $L_{0ce}$  du corps d'épreuve ainsi que la longueur  $L_{0fib}$  de la fibre optique peuvent être déterminées de façon particulièrement optimale, tout comme les  
15 coefficients d'expansion ou de dilatation thermique  $\alpha_{ce}$  du corps d'épreuve,  $\alpha_g$  de l'élément saillant 310 gauche,  $\alpha_d$  de l'élément saillant 310 droit et  $\alpha_f$  de la fibre optique.

De fait, la compensation des contraintes mécaniques ayant pour origine la dilatation thermique des différents  
20 éléments constitutifs du capteur conduit à choisir des coefficients d'expansion thermique respectent au mieux l'égalité :

$$\alpha_{ce} \cdot L_{0ce} = \alpha_g \cdot L_{0g} + \alpha_f \cdot L_{0fib} + \alpha_d \cdot L_{0d}$$

25

D'autre part, pour limiter les erreurs de mesure engendrées par le comportement mécanique non reproductible en cisaillement de la gaine polymère protectrice de la fibre optique lorsque celle-ci est soumise à déformation mécanique

en traction ou en compression et maintenue serrée dans ses éléments saillants de fixation 310, il apparaît que les longueurs  $L_{0ce}$  du corps d'épreuve,  $L_{0g}$  et  $L_{0d}$  des éléments saillants gauche et droit de fixation de la fibre optique et  $L_{0fib}$  de la fibre optique  
5 doivent au mieux respecter l'égalité :

$$L_{0g} = L_{0d} = L_{0fib}/2 = L_{0ce}/4$$

En effet, une telle relation permet de minimiser les  
10 effets de cisaillement de la gaine en polymère de la fibre optique, et plus généralement de tout revêtement déformable, et d'accroître la durée de vie de cette fibre optique en respectant les conditions de Weibull déjà mentionnées.

A titre d'exemple, un dispositif satisfaisant aux  
15 critères précédemment mentionnés pourrait comprendre un corps d'épreuve en Duralumin AU4G ( $E_t \sim 73\text{GPa}$ ), une longueur effective du corps d'épreuve ( $L_{0ce}$ ) de 20 mm, un diamètre extérieur du corps d'épreuve ( $\Phi_{0t}$ ) de 6,2 mm, une épaisseur du corps d'épreuve ( $e_{0t}$ ) de 1 mm, une longueur de fibre optique  
20 ( $L_{0fib}$ ) de 3 mm et une longueur des éléments saillants fixateurs du corps d'épreuve ( $L_{0g}$  et  $L_{0d}$ ) de 8,5 mm chacun.

Selon une autre utilisation d'un dispositif conforme à l'invention, on détermine des conditions telles que l'élongation mécanique d'origine thermique induite sur la fibre optique par le  
25 corps d'épreuve et les deux dispositifs de maintien soit amplifiée afin d'améliorer la résolution de mesure de variations de températures.

Ainsi, au lieu d'atténuer les effets mécaniques induits par la variation de température sur la fibre optique, ce qui n'est

pas la configuration recherchée lorsque le dispositif est configuré pour la mesure préférentielle d'une déformation mécanique ou d'une force, on configure le dispositif selon des conditions telles que la fibre optique présente de fortes variations de déformations d'origine mécanique en cas de variations de la température.

A cet effet, il convient que le corps d'épreuve ait un coefficient d'expansion thermique  $\alpha_{ce}$  le plus grand possible, et notamment supérieur au coefficient d'expansion thermique  $\alpha_f$  de la fibre optique et à ceux  $\alpha_g$  et  $\alpha_d$  des deux éléments de fixation 310 de la fibre optique.

Ainsi, la déformation totale, c'est-à-dire la somme des déformations d'origine mécanique et thermique de la fibre optique à réseau de Bragg, est le résultat amplifié de la déformation thermique du corps d'épreuve, permettant de ce fait une meilleure résolution de la mesure de la température par le réseau de Bragg.

Par ailleurs, pour que cette amplification soit, pour une même géométrie de dispositif, la plus grande possible, il est nécessaire que les coefficients d'expansion thermique  $\alpha_g$  et  $\alpha_d$  des deux éléments de fixation de la fibre optique soient égaux et les plus faibles possibles.

Il est à noter que dans ce cas particulier où seule la mesure de la température est recherchée, il n'est pas indispensable, comme montré sur la figure 6c, de pourvoir le dispositif d'un réseau de Bragg de compensation thermique tel que représenté par la figure 4.

Cette configuration permet de tirer parti des avantages procurés par une utilisation en série de tels capteurs

de température : utilisation d'une fibre unique, sans nécessité d'utiliser des dispositifs tels des coupleurs optiques, pour effectuer des branchements propres à chaque capteur monté en parallèle ayant pour effet, à chaque division du circuit optique, de diviser entre chacune des branches la puissance optique totale transmise au travers de la fibre optique.

Dans une réalisation de l'invention, on utilise un système 600 (figure 6a) de mesures comprenant différents dispositifs 602 conformes à l'invention disposés en parallèles pour effectuer diverses mesures. Une telle application présente l'avantage de pouvoir être effectuée à l'aide d'une unique fibre optique 604, présentant des branchements 606 propres à chaque dispositif 602, au sein desquels est transmis un rayonnement électromagnétique selon différentes longueurs d'ondes.

Dès lors, en considérant que chaque dispositif présente au moins une longueur d'onde de Bragg distincte, il est possible de traiter les informations spectralement multiplexées relatives à chaque dispositif 602 par un même système d'analyse spectrale 608 non représenté en détail. Ce système 608 peut être déporté loin des points de mesure.

Il est aussi possible de réaliser un système de mesure comportant plusieurs fibres optiques distinctes comportant chacune au moins un dispositif selon l'invention. Dans ce cas, la lecture des diverses fibres s'effectue séquentiellement par démultiplexage temporel, la lecture des longueurs d'ondes caractéristiques de chacun de leur(s) réseau(x) de Bragg étant réalisée par démultiplexage spectral comme déjà évoqué.

Pour compenser les dispersions de comportement thermomécaniques entre les dispositifs pouvant provenir d'une dispersion pendant leur processus de fabrication, il est possible d'utiliser un dispositif 610 isolé des contraintes mécaniques extérieures et uniquement soumis aux variations de température comme un dispositif de référence afin de référencer les mesures fournies par les autres dispositifs soumis, quant à eux, à des efforts ou à des déformations extérieurs à mesurer.

Selon une réalisation de l'invention, on utilise une pluralité de réseaux de Bragg au sein d'un corps d'épreuve de façon à définir une déformation de ce corps d'épreuve à partir d'une moyenne des déformations longitudinales mesurées par chaque réseau de Bragg.

Une telle réalisation présente l'avantage de fournir une mesure de meilleure résolution de la valeur recherchée dans un rapport  $1/\text{racine}(n)$  où  $n$  est le nombre de réseaux de Bragg considérés.

Ce mode de réalisation peut être réalisé au moyen d'un tronçon de fibre optique comprenant une pluralité de réseaux de Bragg ou au moyen d'une pluralité de tronçons de fibres optique à réseaux de Bragg.

Dans ce dernier cas, conformément au dispositif de mesure de forces représenté sur la figure 6b, si ces fibres optiques à réseaux de Bragg sont dans un même plan, alignées suivant une même direction, il est possible d'utiliser les mesures fournies par chacun des réseaux de Bragg pour déterminer la valeur d'un couple s'exerçant sur le corps d'épreuve normalement au plan défini par les fibres optiques.

A cet effet, la déformation mécanique moyenne mesurée par chacun de ces réseaux de Bragg pour l'ensemble des fibres optiques permet d'évaluer la valeur de l'effort uniaxial ayant conduit à cette déformation mécanique moyenne, d'une  
5 part, tandis que, d'autre part, les écarts à cette valeur moyenne de chacune des déformations mesurées par chaque fibre, permettent d'évaluer la valeur du couple s'exerçant sur le corps d'épreuve normalement au plan défini par les fibres optiques.

La fixation de la fibre optique au corps d'épreuve est  
10 d'une grande importance pour la fiabilité des mesures et leur reproductibilité. A cet effet, il semble préférable d'utiliser un procédé de fixation de la fibre optique au corps d'épreuve au moyen d'un pincement mécanique qui présente divers avantages tels que le maintien de la zone de serrage, le  
15 démontage aisé de la fixation, par exemple pour précontraindre mécaniquement de façon précise la fibre optique, évitant ainsi de faire subir à la fibre optique des déformations mécaniques inutiles et néfastes pour sa durée de vie, le faible encombrement du dispositif et la possibilité d'utiliser des profils  
20 de rainures divers pour coincer les fibres.

En outre, l'utilisation d'un mandrin spécifique 700 (figures 7a et 7b) de fixation, comprenant trois mors 4 ayant une courbure progressive 704 en bout du dispositif de serrage, permet de maintenir sans glissement une fibre optique avec des  
25 forces de traction ou de compression s'exerçant sur celle-ci particulièrement élevées, sans l'endommager.

Ce dispositif spécifique 700 comporte au moins trois mors 701 répartis autour d'un axe principal 702 confondu avec l'axe de la fibre, chaque mors comprenant une surface

intérieure constituée d'une portion centrale 703 et de deux portions d'extrémité 704, les portions d'extrémité étant réalisées de manière à prolonger la portion centrale en s'écartant progressivement de l'axe principal du dispositif, et  
5 comportant chacune au moins une partie en contact avec la gaine mécaniquement déformable 710 de la fibre 711 lorsque le mors occupe une position de serrage.

A sa position de serrage maximum, ce dispositif présente un diamètre 715 laissé libre par les mors serrés au  
10 maximum qui est un peu supérieur au diamètre du seul coeur 716 de la fibre.

Plusieurs réseaux de Bragg peuvent être inscrits de façon successive dans une même fibre. Si les longueurs d'onde  $\lambda_{B1}$ ,  $\lambda_{B2}$ ...  $\lambda_{Bn}$  de Bragg de ces réseaux sont suffisamment  
15 éloignées entre elles, ces longueurs d'ondes  $\lambda_{B1}$ ,  $\lambda_{B2}$ ...  $\lambda_{Bn}$  peuvent aisément être dissociées sans interférer entre elles de façon à utiliser une seule fibre pour effectuer diverses mesures.

La mesure s'effectue en détectant soit la longueur d'onde de la lumière réfléchie vers la source par le réseau de  
20 Bragg (détection par réflexion), soit la longueur d'onde manquante dans la lumière transmise à l'extrémité distale de la fibre optique (détection par transmission).

Les profils de fond de rainure utilisables pour maintenir une fibre optique sont, dans l'ordre de préférence, de  
25 façon idéale un profil circulaire, et compte tenu des difficultés et des coûts d'usinage, un profil carré (figure 8a), équilatéral (figure 8b) et à angle droit (figure 8c) qui présentent les avantages d'être plus simples à réaliser.

Tout autre profil de fond de rainure plus complexe (à N cotés par exemple) peut être utilisé mais son intérêt en terme de maintien mécanique ou de faible endommagement mécanique de la fibre optique reste limité par rapport aux profils  
5 de fond de rainure précédents.

La déformation plastique de la portion ou du tronçon de fibre optique considéré, si celle-ci est possible, est autorisée dans un tel dispositif à condition cependant que cette portion de fibre optique ainsi déformée ne présente pas de flambage ce qui  
10 est le cas si la fibre optique est toujours sollicitée en traction.

Ceci peut être particulièrement intéressant dans le cas de fibres optiques plastiques dont la matrice est par nature faite d'un matériau non fragile et dont le domaine de déformations plastiques est très étendu.

Dans le cas où la tension mécanique de cette portion de fibre optique, lors du retour élastique du corps d'épreuve ou de sa sollicitation mécanique inverse (traction ou compression), passe par zéro et présente un début de flambage, la mesure alors produite par le réseau de Bragg n'est plus en relation avec  
15 celle du corps d'épreuve et devient sans intérêt.

Il reste alors possible (figure 6e) de conditionner la portion de fibre optique 656 comprenant au moins un réseau de Bragg destiné à la mesure de la déformation mécanique dans un dispositif guide déformable 652, par exemple un tube d'un  
25 diamètre intérieur proche du diamètre extérieur de la fibre optique, afin qu'elle ne puisse plus flamber, permettant de prolonger continûment sa déformation mécanique longitudinale en compression : dans ce cas, la fibre optique étant toujours mécaniquement guidée selon un même axe, sa déformation est

toujours en même relation directe avec celle du corps d'épreuve 654 au travers du coefficient K.

Ce conditionnement particulier de la fibre optique permettant sa sollicitation en compression présente l'avantage  
5 de pouvoir exploiter, en plus du domaine de déformations longitudinales en traction, le domaine de déformations longitudinales en compression de la fibre optique, augmentant d'autant l'étendue des mesures accessibles.

Par exemple, le domaine de déformations élastiques  
10 en compression d'une fibre optique à matrice silice  $\text{SiO}_2$  est au moins trois fois plus étendu que son domaine de déformations élastiques en traction, permettant de multiplier par au moins quatre l'étendue de mesure potentiellement accessible au travers du facteur K, et par conséquent la résolution de mesure  
15 du dispositif.

La présence éventuelle d'une déformation plastique résiduelle sur la fibre optique à réseau de Bragg ne dégrade pas dans une première approximation le facteur d'amplification K, mais peut déplacer le point médian de l'étendue de mesure dans  
20 le cas où le flambage de cette portion de fibre optique n'est pas contenu.

Selon un autre mode de réalisation d'un dispositif destiné préférentiellement à la mesure de déformations d'origine mécanique (figure 6d), la fibre optique 644 est munie :  
25 - d'au moins un réseau de Bragg 642 isolé des actions mécaniques extérieures s'exerçant sur le dispositif destiné à la compensation des effets thermiques et conditionné de façon à être maintenu en tension mécanique entre deux

dispositifs de maintien 640 et 641 dont au moins un d'entre eux est saillant,

- et au moins un réseau de Bragg 646 maintenu en précontrainte mécanique négative positive ou nulle par deux dispositifs de maintien 649 et 650 dont au moins un d'entre eux est saillant, et aligné avec ses deux points d'ancrage 647 et 648, caractérisé en ce que cette portion de fibre peut être maintenue guidée dans un dispositif de maintien anti-flambage tel que décrit en figure 6e.

10 Cette configuration de dispositif présente le double avantage :

- de permettre un multiplexage en série de tels dispositifs car le réseau de Bragg 642 dédié à la compensation des effets thermiques est totalement isolé des actions mécaniques extérieures s'exerçant sur le dispositif, ce qui permet tirer parti des avantages intrinsèques procurés par une telle utilisation : utilisation d'une fibre unique, sans nécessité d'utiliser des dispositifs tels des coupleurs optiques, pour effectuer des branchements propres à chaque capteur monté en parallèle ayant pour effet, à chaque division du circuit optique, de diviser entre chacune des branches la puissance optique totale transmise au travers de la fibre optique,
- d'améliorer la précision du dispositif, car la compensation thermique d'un tel dispositif intègre en plus des solutions précédentes au travers de la structure 643, les effets de la dilatation thermique du corps d'épreuve s'exerçant de façon similaire sur le(s) réseau(x) de Bragg 646 dédiés à la mesure de la déformation mécanique.

Un exemple concret d'application de l'invention réside dans son utilisation, au sein d'un pantographe, pour mesurer la force exercée sur ce dernier par son action sur un caténaire.

- 5 En effet, l'action d'un caténaire sur un pantographe entraîne une faible déformation qui, grâce à l'invention, peut être suffisamment amplifiée pour être mesurée afin de contrôler cette action et assurer ainsi un contact optimal entre le pantographe et le caténaire.

Tableau 1

| <b>Exemples de données d'entrée de l'utilisateur</b> |                  |            |                |            |
|--|------------------|------------|----------------|------------|
| <b>Donnée</b>  | <b>Variable</b>  | <b>Min</b> | <b>Nominal</b> | <b>Max</b> |
| Dynamique totale d'efforts                           | $\Delta F$       | 0 N        |                | 500 N      |
| Résolution souhaitée                                 | $\delta\Delta F$ |            | 1 N            |            |
| Nombre de points de mesure dans la gamme $\Delta F$  |                  |            | 50             | 100        |

Tableau 2

| <b>Exemples de données matériaux et de dimensions considérées</b> |                 |  |                |  |
|---|-----------------|--|----------------|--|
| <b>Donnée</b>   | <b>Variable</b> | <b>Min</b>   | <b>Nominal</b> | <b>Max</b>   |
| Coefficient d'expansion thermique                                 | $\alpha_{ce}$   | $0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  |                | $25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$   |
| Module d'Young  | $E_t$           | 73 GPa<br>(Duralumin)  |                | 210 GPa<br>(aciers)  |
| Hauteur du tube corps d'épreuve                                   | $L_{0ce}$       | 15 mm  |                | 20 mm  |
| Diamètre extérieur du tube corps d'épreuve                        | $\Phi_{0t}$     | 6,2 mm   |                | 20 mm  |
| Épaisseur du tube corps d'épreuve                                 | $e_{0t}$        | $\left\{ \begin{array}{l} \min\left(\varepsilon_{\min}, \frac{\phi_{0t} - d}{2}\right) - j \\ \varepsilon_{\min} = 1 \text{ mm} \end{array} \right.$ |                | $\left\{ \begin{array}{l} \min\left(\varepsilon_{\max}, \frac{\phi_{0t} - d}{2}\right) - j \\ \varepsilon_{\max} = 3 \text{ mm} \end{array} \right.$ |
| Diamètre du dispositif de maintien                                | $d$             | 4 mm   |                |  |
| Jeu entre le tube et le dispositif de maintien                    | $j$             |  | 0,1 mm         |  |
| Longueur de base de la fibre                                      | $L_{0fib}$      | 2 mm   | 4 mm           | 10 mm  |

En bref :

1. L'invention concerne ainsi un dispositif de mesure de déformations uniaxiales comprenant un tronçon de fibre optique muni d'au moins un réseau de Bragg aligné selon la direction de l'axe de mesure, et un corps d'épreuve soumis aux déformations à mesurer et les transmettant au tronçon de fibre optique, ce dispositif étant destiné à être mis dans des conditions de fonctionnement où la fibre est excitée par une onde lumineuse comportant la longueur d'onde de Bragg ou les longueurs d'onde de Bragg que peuvent atteindre tous les réseaux de Bragg inscrits dans cette fibre et où cette fibre est reliée à des moyens de lecture de la longueur d'onde de Bragg de chacun de ces réseaux et, s'il y a plusieurs réseaux de Bragg, de moyens de démultiplexage, ce dispositif étant caractérisé en ce que :

- les points de fixation aptes à soumettre ce tronçon de fibre à une précontrainte négative, positive ou nulle, et à lui transmettre les élongations du corps d'épreuve, sont séparés par une distance ( $L_{\text{fib}}$ ) présentant une variation ( $\Delta L_{\text{fib}}$ ) lorsque le corps d'épreuve est sollicité par la déformation à mesurer,

- la longueur effective ( $L_{\text{ce}}$ ) du corps d'épreuve présente une élongation ( $\Delta L_{\text{ce}}$ ), lorsque le corps d'épreuve est sollicité par la déformation à mesurer,

- la longueur ( $L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique et la longueur effective ( $L_{\text{ce}}$ ) du corps de mesure sont telles que la déformation longitudinale ( $\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de la fibre optique est strictement supérieure à la déformation ( $\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}}$ ) du

corps d'épreuve qui en est à l'origine, définissant ainsi un coefficient d'amplification  $K$  strictement supérieur à 1, et égal au premier ordre au quotient  $(\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}}) / (\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}})$ .

Le dispositif peut aussi présenter les caractéristiques  
5 suivantes :

2. La longueur ( $L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique est inférieure à la longueur ( $L_{\text{ce}}$ ) du corps d'épreuve.

3. La variation de longueur ( $\Delta L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique est égale à la variation de longueur ( $\Delta L_{\text{ce}}$ ) du corps  
10 d'épreuve.

4. La fibre optique comprend une pluralité de réseaux de Bragg affectés à la mesure des déformations d'un même corps d'épreuve, et la longueur ( $L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique est supérieure à la plus petite distance le long de la  
15 fibre optique qui comporte tous ces réseaux de Bragg.

5. La précontrainte place le tronçon de fibre optique en tension, et les déformations à mesurer augmentent cette tension.

6. La précontrainte place le tronçon de fibre optique en tension, les déformations à mesurer diminuent cette tension, et la précontrainte initiale est suffisante pour que le tronçon de fibre optique reste toujours tendu même lorsqu'il est soumis à la plus grande déformation de son étendue de mesure.  
20

7. La précontrainte place le tronçon de fibre optique en compression, et ce tronçon de fibre est entouré d'un dispositif anti-flambage.  
25

8. Le dispositif anti-flambage comporte au moins un tronçon d'une gaine rigide déformable entourant la fibre optique et coulissant sur elle avec un jeu le plus faible possible,

ces tronçons étant séparés entre eux par des pièces cylindriques ou toriques en matériau suffisamment élastique pour autoriser la plus forte déformation en compression que peut atteindre le tronçon de fibre optique sur son étendue de mesure.

5                   9. Un dispositif de mesure de forces ou de contraintes mécaniques comporte des moyens aptes à transformer ces forces ou ces contraintes mécaniques en une déformation uniaxiale mesurée par un dispositif conforme à l'un des points 1 à 8.

10                   10. Le dispositif selon le point 9, comprend en outre un réseau de Bragg, sur un second tronçon de fibre optique, ce réseau étant découplé des efforts mécaniques extérieurs à mesurer, et soumis à la même température que le(s) réseau(x) de Bragg du premier tronçon dédié(s) à la mesure des efforts  
15 mécaniques déformant le corps d'épreuve, ceci afin d'effectuer une compensation des effets thermiques sur la mesure.

                  11. Un dispositif de mesure de températures comporte des moyens aptes à transformer ces températures en une déformation uniaxiale mesurée par un dispositif conforme à  
20 l'un des points 1 à 8.

                  12. Le dispositif comprend des moyens aptes à homogénéiser la température des réseaux de Bragg affectés à un même corps d'épreuve.

                  13. Les moyens aptes à homogénéiser la  
25 température permettent la libre circulation d'un fluide caloporteur.

                  14. Le corps d'épreuve est de section constante.

                  15. Le corps d'épreuve est de section variable.

16. Le dispositif comprend au moins un élément saillant, solidaire du corps d'épreuve, auquel est fixée la fibre optique, cet élément saillant étant indéformable vis-à-vis des actions extérieures à mesurer auxquelles est soumis le corps d'épreuve.

17. Le corps d'épreuve, la fibre optique et l'élément (ou les éléments) saillant(s) vérifient la relation :

$$\alpha_{ce} \cdot L_{0ce} = \alpha_g \cdot L_{0g} + \alpha_f \cdot L_{0fib} + \alpha_d \cdot L_{0d}$$

10

où  $\alpha_{ce}$  est le coefficient d'expansion thermique du corps d'épreuve et  $L_{0ce}$  sa longueur,  $\alpha_g$  et  $\alpha_d$  les coefficients d'expansion thermique du ou des éléments saillants et  $L_{0g}$  et  $L_{0d}$  leur longueur, et  $\alpha_f$  le coefficient d'expansion thermique de la fibre optique et  $L_{0fib}$  sa longueur en pré-contrainte mécanique entre ses deux points d'accrochage.

15

18. Pour toute portion de fibre optique maintenue précontrainte entre 2 dispositifs de fixation, le corps d'épreuve, la fibre optique et les éléments vérifient la relation :

20

$$L_{0g} = L_{0d} = L_{0fib}/2 = L_{0ce}/4$$

où  $L_{0ce}$  est la longueur effective du corps d'épreuve,  $L_{0g}$  et  $L_{0d}$  la longueur des éléments saillants, et  $L_{0fib}$  la longueur de la fibre optique en pré-contrainte mécanique entre les deux éléments saillants.

25

19. A chacune de ses extrémités, le tronçon de fibre optique est fixé à un dispositif de fixation comportant un mandrin spécifique (700) comportant au moins trois mors (701)

répartis autour d'un axe principal (702) confondu avec l'axe de la fibre, chaque mors comprenant une surface intérieure constituée d'une portion centrale (703) et de deux portions d'extrémités (704), les portions d'extrémité étant réalisées de manière à prolonger la portion centrale en s'écartant progressivement de l'axe principal du dispositif, et comportant chacune au moins une partie en contact avec la gaine mécaniquement déformable (710) de la fibre (711) lorsque le mors occupe une position de serrage.

10           20. Le diamètre (715) laissé libre par les mors serrés au maximum est un peu supérieur au diamètre du seul coeur (716) de la fibre.

          21. Le corps d'épreuve est solidaire d'un, ou incorporé dans un, pantographe.

15           22. Un dispositif de mesure de forces ou de contraintes mécaniques selon le point 9 ou 10 dans lequel le produit du module d'Young du matériau constituant le corps d'épreuve par la plus petite section soumise à déformation est le plus faible possible, sans toutefois permettre à ce corps d'épreuve de se déformer en un quelconque de ses points de façon plastique.

          23. Un dispositif de mesure de températures conforme à l'un des points 11, 12 ou 13 selon lequel le coefficient d'expansion thermique du corps d'épreuve  $\alpha_{ce}$  est le plus grand possible, et notamment supérieur au coefficient d'expansion thermique  $\alpha_f$  de la fibre optique et à ceux  $\alpha_g$  et  $\alpha_d$  des deux éléments de fixation (310) de la fibre optique.

          24. Un système de mesures de déformations, comportant plusieurs fibres optiques, chacune munie d'au moins

un dispositif selon l'un des points 1 à 23, qui comporte un dispositif de démultiplexage temporel permettant de lire successivement les signaux de chacune des fibres, et en ce que ces signaux sont ensuite démultiplexés spectralement pour  
5 obtenir la longueur d'onde caractéristique de chacun des réseaux de Bragg.

25. Un dispositif selon l'un des points 22 ou 23 qui mesure la résultante des interactions mécaniques extérieures agissant sur un pantographe.

## **REVENDEICATIONS**

1. Dispositif de mesure de déformation uniaxiales comprenant un tronçon de fibre optique muni d'au moins un réseau de Bragg aligné selon la direction de l'axe de mesure, et un corps d'épreuve soumis aux déformations à mesurer et les transmettant au tronçon de fibre optique, ce dispositif étant destiné à être mis dans des conditions de fonctionnement où la fibre est excitée par une onde lumineuse comportant la longueur d'onde de Bragg ou de les longueurs d'onde de Bragg que peuvent atteindre tous les réseaux de Bragg inscrits dans cette fibre et où cette fibre est reliée à des moyens de lecture de la longueur d'onde de Bragg de chacun de ces réseaux et, s'il y a plusieurs réseaux de Bragg, de moyens de démultiplexage, ce dispositif étant caractérisé en ce que :
- les points de fixation aptes à soumettre ce tronçon de fibre à une précontrainte négative, positive ou nulle, et à lui transmettre les élongations du corps d'épreuve, sont séparés par une distance ( $L_{\text{fib}}$ ) présentant une variation ( $\Delta L_{\text{fib}}$ ) lorsque le corps d'épreuve est sollicité par la déformation à mesurer),
  - la longueur effective ( $L_{\text{ce}}$ ) du corps d'épreuve présente une élongation ( $\Delta L_{\text{ce}}$ ), lorsque le corps d'épreuve est sollicité par la déformation à mesurer,
  - la longueur ( $L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique et la longueur effective ( $L_{\text{ce}}$ ) du corps de mesure sont tels que la déformation longitudinale ( $\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de la fibre optique est strictement supérieure à la déformation ( $\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}}$ ) du corps d'épreuve qui en est à l'origine, définissant ainsi un coefficient d'amplification  $K$  strictement supérieur à 1, et égal au premier ordre au quotient  $(\Delta L_{\text{fib}}/L_{\text{fib}}) / (\Delta L_{\text{ce}}/L_{\text{ce}})$ .

2. Dispositif selon la revendication 1 caractérisé en ce que la longueur ( $L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique est inférieure à la longueur ( $L_{\text{ce}}$ ) du corps d'épreuve.

3. Dispositif selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce que la variation de longueur ( $\Delta L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique est égale à la variation de longueur ( $\Delta L_{\text{ce}}$ ) du corps d'épreuve.

4. Dispositif selon la revendication 1, 2 ou 3, caractérisé en ce que la fibre optique comprend une pluralité de réseaux de Bragg affectés à la mesure des déformations d'un même corps d'épreuve, et en ce que la longueur ( $L_{\text{fib}}$ ) du tronçon de fibre optique est supérieure à la plus petite distance le long de la fibre optique qui comporte tous ces réseaux de Bragg.

5. Dispositif selon la revendication 1, 2, 3 ou 4 caractérisé en ce que la précontrainte place le tronçon de fibre optique en tension, et en ce que les déformations à mesurer augmentent cette tension.

6. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce que la précontrainte place le tronçon de fibre optique en tension, en ce que les déformation à mesurer diminuent cette tension, et en ce que la précontrainte initiale est suffisante pour que le tronçon de fibre optique reste toujours tendu même lorsqu'il est soumis à la plus grande déformation de son étendue de mesure.

7. Dispositif selon la revendication 1, 2, 3 ou 4 caractérisé en ce que la précontrainte place le tronçon de fibre optique en compression, et en ce que ce tronçon de fibre est entouré d'un dispositif anti-flambage.

8. Dispositif selon la revendication 7, caractérisé en ce que le dispositif anti-flambage comporte au moins un tronçon d'une

gaine rigide déformable entourant la fibre optique et coulissant sur elle avec un jeu le plus faible possible, ces tronçons étant séparés entre eux par des pièces cylindriques ou toriques en matériau suffisamment élastique pour autoriser la plus forte déformation en compression que  
5 peut atteindre le tronçon de fibre optique sur son étendue de mesure.

9. Dispositif de mesure de forces ou de contraintes mécaniques comportant des moyens aptes à transformer ces forces ou ces contraintes mécaniques en une déformation uniaxiale mesurée par un dispositif conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 8.

10 10. Dispositif selon la revendication 9, caractérisé en ce qu'il comprend en outre un réseau de Bragg, sur un second tronçon de fibre optique, ce réseau étant découplé des efforts mécaniques extérieurs à mesurer, et soumis à la même température que le(s) réseau(x) de Bragg du premier tronçon dédié(s) à la mesure des  
15 efforts mécaniques déformant le corps d'épreuve, ceci afin d'effectuer une compensation des effets thermiques sur la mesure.

11. Dispositif de mesure de températures comportant dans des moyens aptes à transformer ces températures en une déformation uniaxiale mesurée par un dispositif conforme à l'une  
20 quelconque des revendications 1 à 8.

12. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 11 caractérisé en ce qu'il comprend des moyens aptes à homogénéiser la température des réseaux de Bragg affectés à un même corps d'épreuve.

25 13. Dispositif selon la revendication 12 caractérisé en ce que les moyens aptes à homogénéiser la température permettent la libre circulation d'un fluide caloporteur.

14. Dispositif selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend un corps d'épreuve de section constante.

5 15. Dispositif selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend un corps d'épreuve de section variable.

10 16. Dispositif selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend au moins un élément saillant, solidaire du corps d'épreuve, auquel est fixée la fibre optique, cet élément saillant étant indéformable vis-à-vis des actions extérieures à mesurer auxquelles est soumis le corps d'épreuve.

17. Dispositif selon la revendication 16 caractérisé en ce que le corps d'épreuve, la fibre optique et l'élément (ou les éléments) saillant(s) vérifient la relation :

15 
$$\alpha_{ce} \cdot L_{0ce} = \alpha_g \cdot L_{0g} + \alpha_f \cdot L_{0fib} + \alpha_d \cdot L_{0d}$$

où  $\alpha_{ce}$  est le coefficient d'expansion thermique du corps d'épreuve et  $L_{0ce}$  sa longueur,  $\alpha_g$  et  $\alpha_d$  les coefficients d'expansion thermique du ou des éléments saillants et  $L_{0g}$  et  $L_{0d}$  leur longueur, et  $\alpha_f$  le coefficient d'expansion thermique de la fibre optique et  $L_{0fib}$  sa  
20 longueur en pré-contrainte mécanique entre ses deux points d'accrochage.

18. Dispositif selon la revendication 16 ou 17 caractérisé en ce que, pour toute portion de fibre optique maintenue précontrainte entre 2 dispositifs de fixation, le corps d'épreuve, la fibre optique et les  
25 éléments vérifient la relation :

$$L_{0g} = L_{0d} = L_{0fib}/2 = L_{0ce}/4$$

où  $L_{0ce}$  est la longueur effective du corps d'épreuve,  $L_{0g}$  et  $L_{0d}$  la longueur des éléments saillants, et  $L_{0fib}$  la longueur de la fibre

optique en pré-contrainte mécanique entre les deux éléments saillants.

19. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes dans lequel, à chacune de ses extrémités, le tronçon de fibre optique est fixé à un dispositif de fixation comportant un mandrin spécifique (700) comportant au moins trois mors (701) répartis autour d'un axe principal (702) confondu avec l'axe de la fibre, chaque mors comprenant une surface intérieure constituée d'une portion centrale (703) et de deux portions d'extrémités (704), les portions d'extrémité étant réalisées de manière à prolonger la portion centrale en s'écartant progressivement de l'axe principal du dispositif, et comportant chacune au moins une partie en contact avec la gaine mécaniquement déformable (710) de la fibre (711) lorsque le mors occupe une position de serrage.

20. Dispositif selon la revendication 19 caractérisé en ce que le diamètre (715) laissé libre par les mors serrés au maximum est un peu supérieur au diamètre du seul cœur (716) de la fibre.

21. Dispositif selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisé en ce que le corps d'épreuve est solidaire, ou incorporé dans, un pantographe.

22. Dispositif de mesure de forces ou de contraintes mécaniques conforme à l'une des revendications 9 ou 10 caractérisé en ce que le produit du module d'Young du matériau constituant le corps d'épreuve par la plus petite section soumise à déformation est le plus faible possible, sans toutefois permettre à ce corps d'épreuve de se déformer en un quelconque de ses points de façon plastique.

23. Dispositif de mesure de températures conforme à l'une des revendications 11, 12 ou 13 selon lequel le coefficient d'expansion thermique du corps d'épreuve  $\alpha_{ce}$  est le plus grand

possible, et notamment supérieur au coefficient d'expansion thermique  $\alpha_f$  de la fibre optique et à ceux  $\alpha_g$  et  $\alpha_d$  des deux éléments de fixation (310) de la fibre optique.

24. Système de mesures de déformations, comportant  
5 plusieurs fibres optiques, chacune munie d'au moins un dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 23, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de démultiplexage temporel permettant de lire successivement les signaux de chacune des fibres, et en ce que ces  
10 signaux sont ensuite démultiplexés spectralement pour obtenir la longueur d'onde caractéristique de chacun des réseaux de Bragg.

25. Système selon l'une des revendications 22 ou 23 caractérisé en ce qu'il mesure la résultante des interactions mécaniques extérieures agissant sur un pantographe.

FIG.1a

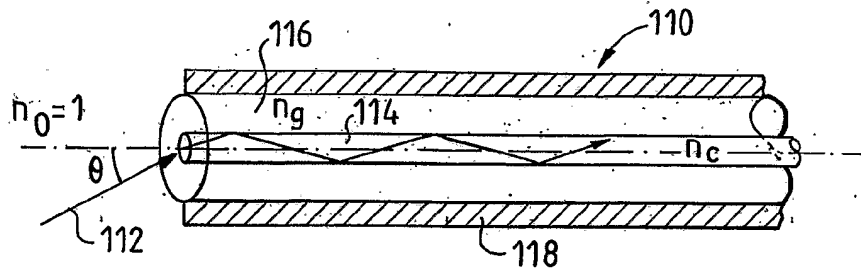


FIG.1b

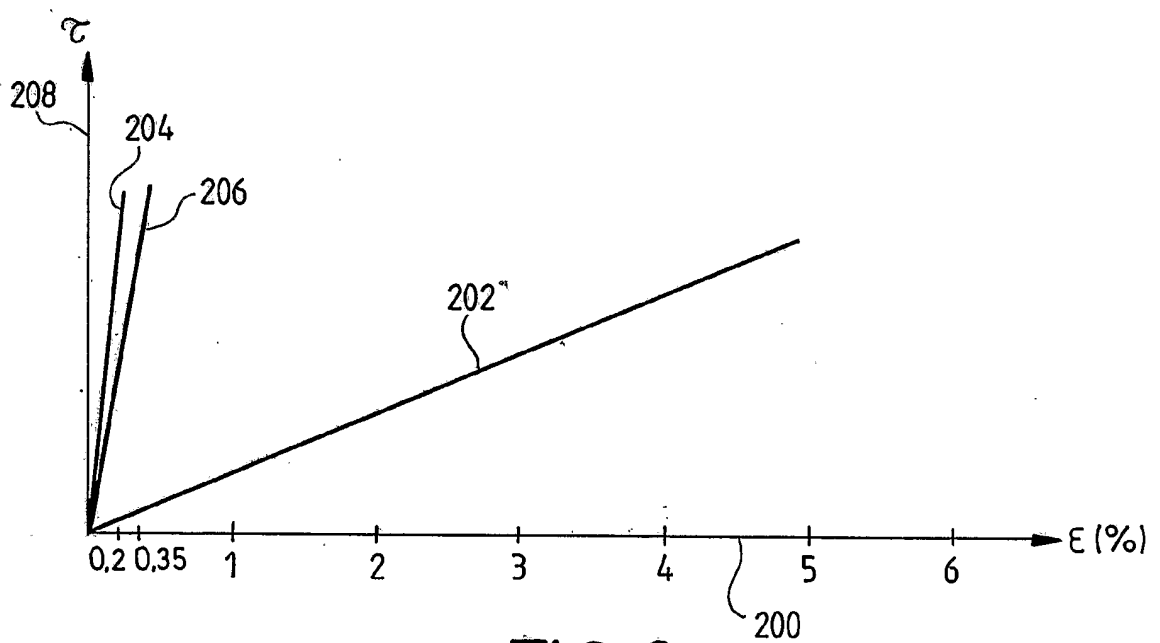
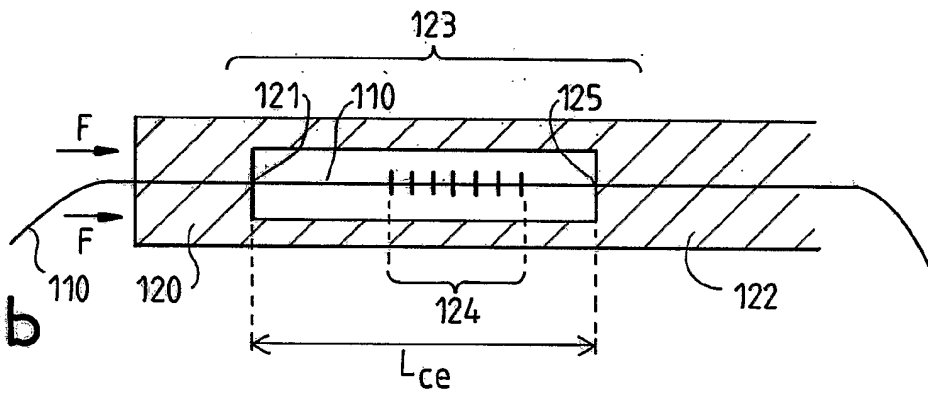


FIG.2

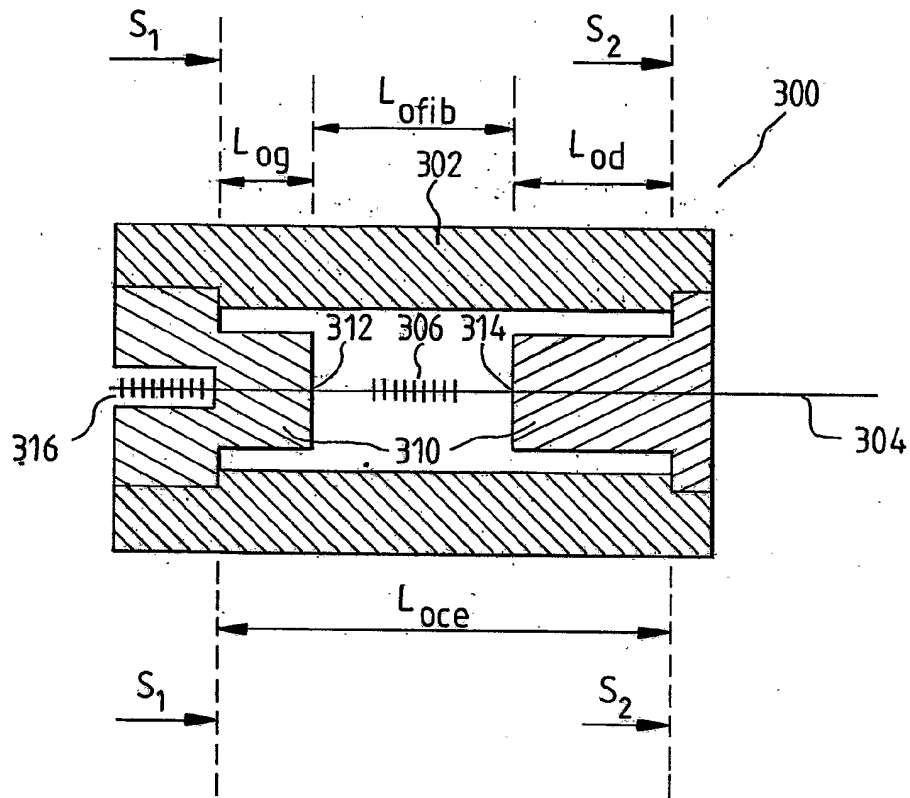


FIG. 3

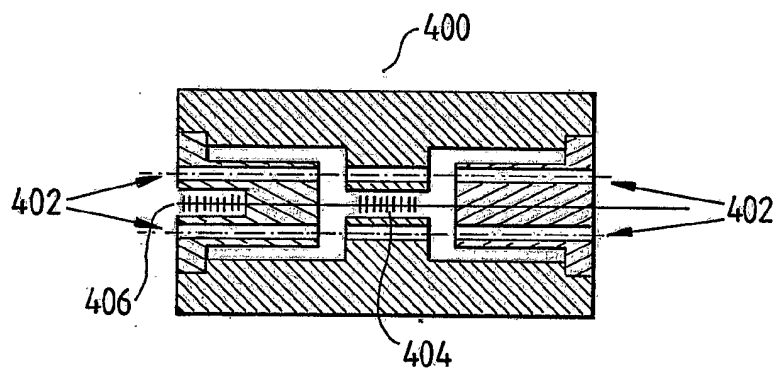


FIG. 4

3/6

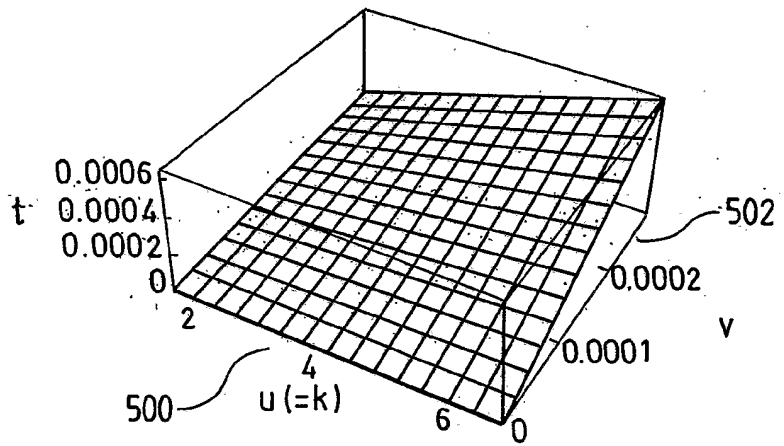


FIG.5a

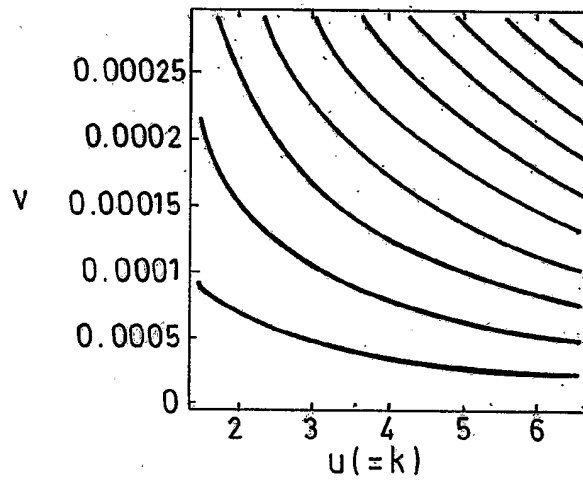


FIG.5b

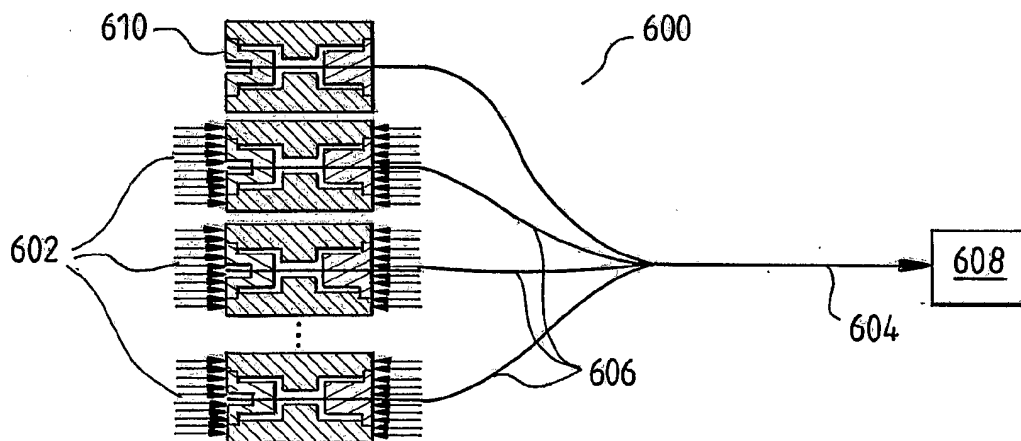


FIG.6a

4/6

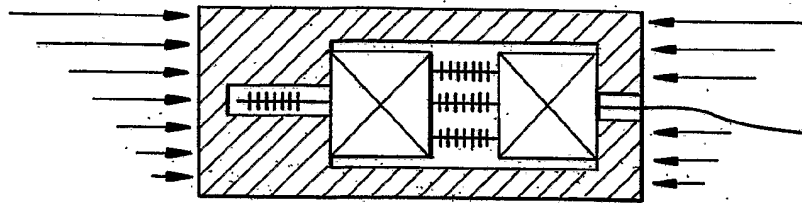


FIG. 6b

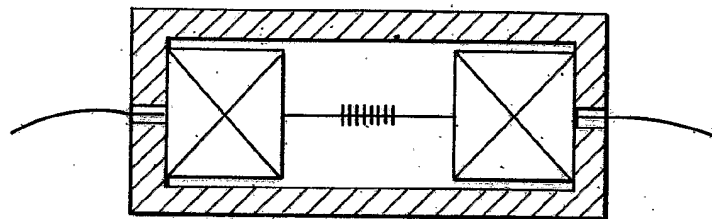


FIG. 6c

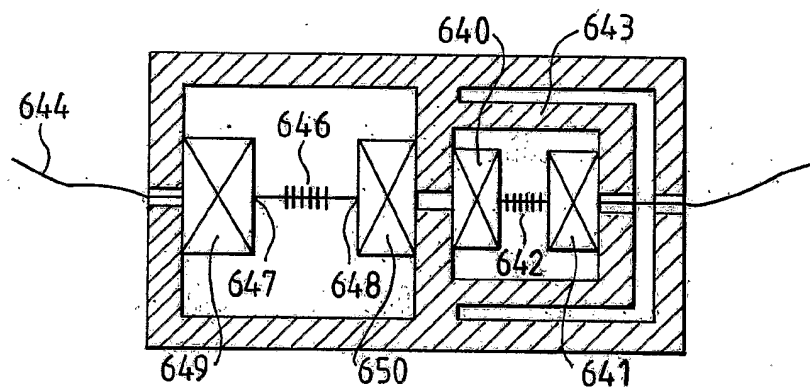


FIG. 6d

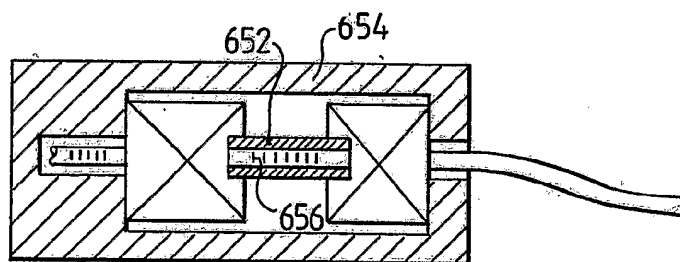


FIG. 6e

5/6

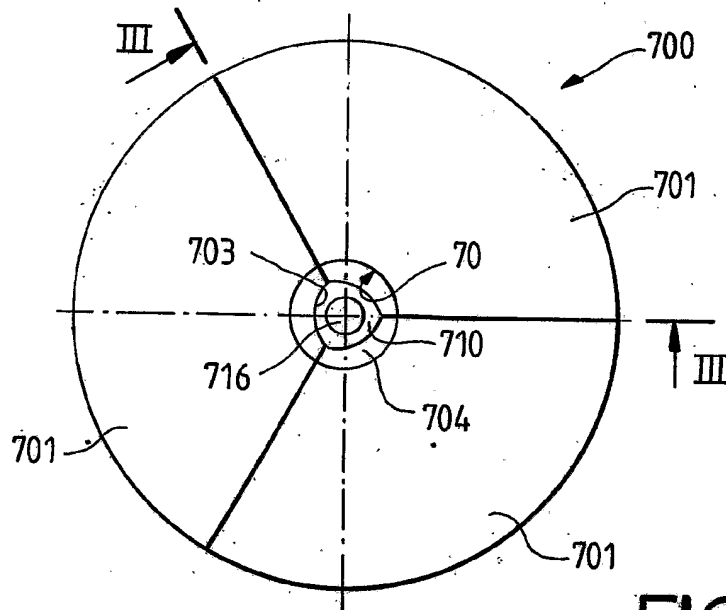


FIG. 7a

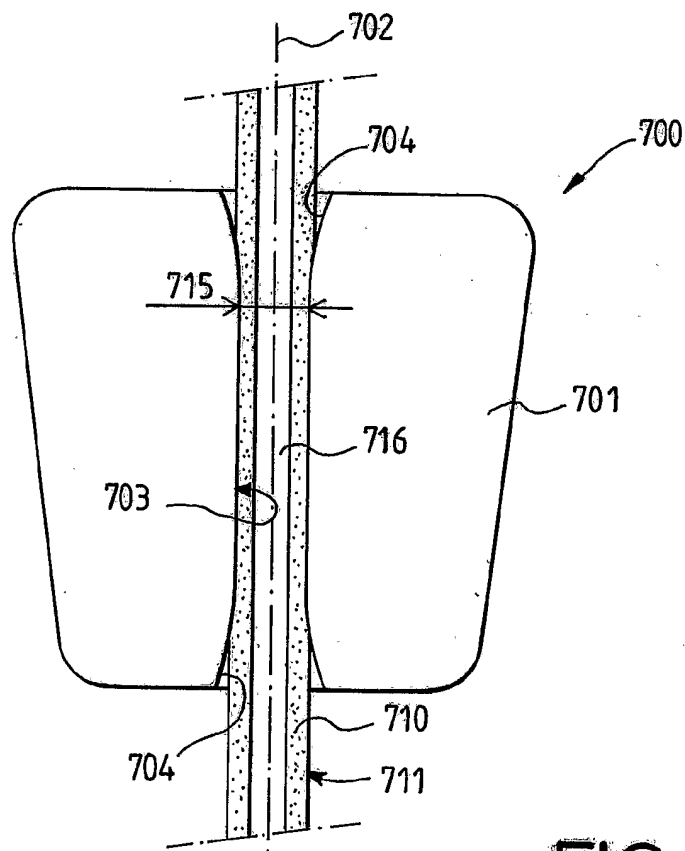
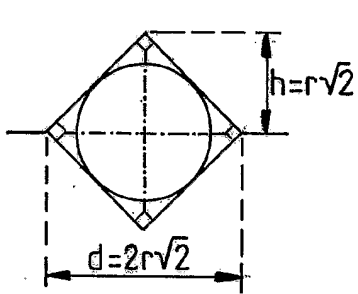
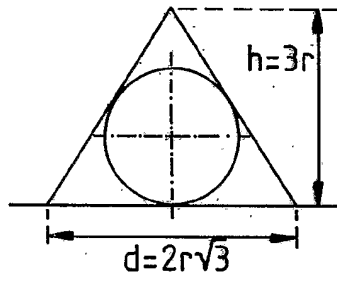


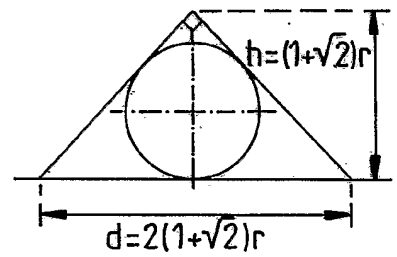
FIG. 7b



**FIG.8a**



**FIG.8b**



**FIG.8c**