

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

①① N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**3 043 457**

②① N° d'enregistrement national : **15 60681**

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : **G 01 D 5/353 (2015.01)**

⑫

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤④ DISPOSITIF OPTOELECTRONIQUE DE MESURE REPARTIE PAR DIFFUSION BRILLOUIN.

②② Date de dépôt : 06.11.15.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 12.05.17 Bulletin 17/19.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 07.02.20 Bulletin 20/06.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *FEBUS OPTICS Société par actions  
simplifiée — FR.*

⑦② Inventeur(s) : LANTICQ VINCENT.

⑦③ Titulaire(s) : FEBUS OPTICS Société par actions  
simplifiée.

⑦④ Mandataire(s) : API CONSEIL.

**FR 3 043 457 - B1**



## DISPOSITIF OPTOELECTRONIQUE DE MESURE REPARTIE PAR DIFFUSION BRILLOUIN

### [Domaine de l'invention]

5 [001] L'invention concerne un dispositif optoélectronique de mesure répartie par diffusion Brillouin dans une fibre optique utilisant une seule fréquence laser pour générer une impulsion de lumière. Ce type de dispositif est encore dénommé capteur à fibre optique réparti par rétrodiffusion Brillouin.

10 [002] De tels dispositifs sont utilisés pour le contrôle permanent de l'intégrité et de la sécurité des systèmes et structures dans le génie civil ou l'industrie pétrolière. Ils sont notamment utilisés pour la surveillance des ouvrages linéaires comme les ponts, les barrages, les digues hydrauliques en terre ou les réseaux de transport de fluides (eau, hydrocarbures, gaz) afin de contrôler les mouvements de terrain (glissement, tassement) ou les déformations des conduites enterrées ou non. Une fibre optique est  
15 disposée le long d'un ouvrage à surveiller et un signal lumineux est injecté dans ladite fibre. Le signal lumineux rétrodiffusé par la fibre optique permet ensuite d'en déduire l'état structurel de l'ouvrage.

### [Art antérieur]

20 [003] Ces dispositifs optoélectroniques de mesure répartie par diffusion Brillouin sont plus particulièrement utilisés pour mesurer, en temps réel, la température ou les déformations des infrastructures de grandes tailles afin de surveiller leur santé structurelle et d'assurer leur maintenance. Ils fournissent, à chaque mesure, les informations de température et de déformation en tout point de la fibre optique qui leur est raccordée. Les mesures sont généralement réalisées avec une portée de quelques  
25 mètres à plusieurs dizaines de kilomètres et une résolution métrique voire centimétrique. Ainsi, par exemple, une mesure peut être réalisée tous les mètres sur un ouvrage d'une longueur de 20 kilomètres.

[004] Des tels dispositifs exploitant le phénomène de rétrodiffusion Brillouin sont déjà  
30 connus et utilisés pour des applications de mesures de température et de déformation dans le génie civil.

[005] La fréquence Brillouin  $\nu_B$ , dépend linéairement de la température et de la déformation dans le matériau. Le décalage fréquentiel  $\Delta\nu_B$  entre l'onde incidente et l'onde rétrodiffusée varie donc avec les variations de température  $\Delta T$  et de déformation  $\varepsilon$  suivant l'équation :  $\Delta\nu_B = C_T\Delta T + C_\varepsilon\varepsilon$ , où  $C_T$  et  $C_\varepsilon$  sont respectivement les coefficients de sensibilité de température et de déformation propres à la fibre optique utilisée. A la longueur d'onde  $\lambda_0 = 1550$  nm et pour une fibre standard telle que définie par la norme ITU-G652 (comme par exemple les fibres Corning® - SMF-28™), les coefficients sont de l'ordre de  $C_T \approx 1\text{MHz}/^\circ\text{C}$  et  $C_\varepsilon \approx 0.05\text{MHz}/\mu\varepsilon$ .

[006] Pour pouvoir analyser des variations d'intensité sur des dizaines de kilomètres avec une résolution spatiale métrique, les systèmes de mesure utilisent en général la réflectométrie optique temporelle OTDR (de l'acronyme anglais « Optical Time Domain Reflectometry »). L'OTDR consiste à propager une impulsion lumineuse dans la fibre optique à analyser et à mesurer l'intensité retour en fonction du temps. Le temps que met la lumière rétrodiffusée à être détectée permet de localiser l'évènement à mesurer (coordonnée d'un point  $z$  le long de la fibre optique). La résolution spatiale est alors fonction de la largeur de l'impulsion lumineuse : une impulsion de largeur 10 ns entraînant par exemple une résolution d'environ 1 m.

[007] Grâce au phénomène de rétrodiffusion Brillouin combiné à la technique de l'OTDR, on réalise des mesures de température et de déformation réparties tout le long de la fibre, sur plusieurs dizaines de kilomètres, avec une résolution métrique voire centimétrique.

[008] Les mesures le long de la fibre sont effectuées avec un dispositif tel que schématisé sur la Figure 1. La lumière issue d'une source lumineuse 1, tel qu'un laser, est répartie dans deux bras. L'un des bras, appelé « pompe », permet d'envoyer le signal lumineux, sous forme impulsionnelle grâce à un modulateur acousto-optique 3, dans la fibre optique 5 à tester. Un signal est rétrodiffusé par la fibre 5, selon le phénomène Brillouin. Selon le phénomène Brillouin, les composantes spectrales de rétrodiffusion de la lumière par le matériau de constitution de la fibre optique, en général de la silice, présentent une fréquence  $\nu_{Bz}$  décalée de celle  $\nu_0$  de l'onde lumineuse incidente. Le décalage fréquentiel Brillouin est en général de l'ordre de 11GHz pour une onde incidente de longueur d'onde  $\lambda_0 = 1550\text{nm}$ . Une telle fréquence est très élevée. Pour pouvoir effectuer le traitement sur le signal rétrodiffusé on peut transposer

la fréquence à une plus basse fréquence pour réduire la bande passante du détecteur à utiliser et ainsi éliminer une grande partie du bruit. Pour cela on procède à une détection hétérodyne tel que décrit par exemple dans le document US 7 283 216. La détection hétérodyne consiste à recombinaison le signal rétrodiffusé à analyser avec une  
5 onde provenant de l'autre bras, appelé « oscillateur local » 6. Cet oscillateur local 6 peut par exemple se présenter sous la forme d'un laser en anneau Brillouin. Dans ce cas, le signal lumineux continu de fréquence  $\nu_0$  est dirigé vers un circulateur 7 qui le dirige à son tour vers une fibre de référence. Cette fibre de référence émet par diffusion spontanée amplifiée un rayonnement en sens inverse de fréquence  $\nu_0 + \nu_{\text{Bref}}$  que le  
10 circulateur envoie vers un coupleur 13. Ce dernier envoie une partie de l'énergie vers le signal de sortie, tandis qu'il redirige l'autre partie vers la fibre de référence où le rayonnement est amplifié d'un facteur de gain  $G$  par diffusion Brillouin stimulée avant d'être redirigé vers le circulateur 7 qui renvoie le rayonnement amplifié vers le coupleur  
15 13 et la sortie. L'oscillateur local 6 forme alors un anneau d'amplification par diffusion Brillouin stimulée. Un photo-détecteur 9 permet de récupérer le battement des deux signaux. Le battement récupéré est ensuite amplifié puis transmis à un analyseur 10 de spectre électrique.

[009] Un tel dispositif optoélectronique de mesure répartie par diffusion Brillouin dans une fibre optique, utilisant une seule fréquence laser pour générer une impulsion de  
20 lumière, est plus particulièrement décrit dans le document US 7 283 216. Le dispositif selon ce document permet d'effectuer, en temps réel, des mesures simultanées de température et de contraintes. Un détecteur hétérodyne permet de récupérer le battement, entre le signal issu de l'oscillateur local et le signal rétrodiffusé par la fibre à analyser, qui se situe dans une bande de fréquences exploitable par un récepteur  
25 analogique. L'oscillateur local utilisé dans ce document est formé par un laser en anneau Brillouin et impose que le circuit soit cohérent, c'est-à-dire que l'onde retour soit en phase avec l'onde incidente. La longueur de la fibre de référence et la fréquence laser doivent donc être contrôlées et ajustées de manière à ce que la cavité de l'oscillateur local fournisse la bonne fréquence  $\nu_0$  pour permettre de transposer la  
30 fréquence, du signal rétrodiffusé par la fibre à tester, à une plus basse fréquence. Le dispositif décrit dans ce document est donc complexe à mettre en œuvre car il nécessite des contrôles préalables pour ne pas créer de perturbations sur le signal retour. De plus, la détection est une détection hétérodyne analogique, nécessitant

l'utilisation de composants électroniques analogiques relativement encombrants et consommateurs d'énergie.

5 [0010] Le document CA 2 274 505 décrit un dispositif et un procédé pour mesurer avec précision et simultanément les variations de température et les contraintes tout le long d'une fibre optique, elle-même disposée le long d'un ouvrage dont la structure est à surveiller. Le dispositif décrit est cependant complexe à mettre en œuvre. En effet l'analyse du signal détecté est complexe car elle tient compte non seulement du phénomène de rétrodiffusion Brillouin mais aussi d'un autre phénomène de rétrodiffusion Rayleigh. Un détecteur optique comprenant un filtre optique à balayage  
10 permet de résoudre des pics de Rayleigh et des pics de Brillouin et de convertir les signaux optiques en signaux électriques, lesquels sont ensuite traités par un moyen de traitement analogique. La mesure de la température et de la contrainte en tout point le long de la fibre, revient à déterminer la vitesse de balayage du filtre optique, plus lente que la vitesse de répétition des impulsions optiques, à mesurer l'amplitude et la  
15 fréquence des raies Brillouin par rapport aux raies Rayleigh en fonction du temps, puis à établir une comparaison par rapport à une fibre de référence. De plus, le dispositif décrit dans ce document effectue une détection optique directe et non une détection hétérodyne. En outre, un tel dispositif procure une faible résolution en fréquence induite par l'utilisation d'un filtre optique à balayage.

20 [0011] Il arrive fréquemment que les ouvrages de génie civil, dont la structure est à analyser, soient isolés de toute activité humaine et donc, de tout réseau électrique. Dans ce cas, afin de surveiller tout ou partie de l'ouvrage, un système de mesure autonome en énergie est nécessaire. Les dispositifs existant de mesure répartie par diffusion Brillouin ne permettent pas un fonctionnement autonome et faiblement  
25 consommateur d'énergie. Ils doivent donc être disposés à proximité de locaux techniques souvent distants les uns des autres de plusieurs centaines de kilomètres. Cette distance étant supérieure à la portée maximale de ces dispositifs, une partie des ouvrages de génie civil ne peut alors pas être surveillée en continu par les dispositifs existant de mesure répartie par diffusion Brillouin.

30 [0012] De plus un autre inconvénient des systèmes existant est la durée des mesures car cette durée est longue. En effet, typiquement, la durée de mesure est supérieure à 1 minute pour une fibre de 10Km.

[Problème technique]

[0013] L'invention a donc pour but de remédier aux inconvénients de l'art antérieur. L'invention vise notamment à proposer un dispositif optoélectronique de mesure répartie par diffusion Brillouin, simple et peu encombrant, dont la configuration optoélectronique permet une réduction significative de la consommation d'énergie électrique par rapport aux dispositifs existants, de sorte qu'il puisse être alimenté en basse tension, typiquement en 12 ou 24 Volts, à partir d'une batterie par exemple.

[0014] Le dispositif proposé selon l'invention comporte moins d'éléments que les systèmes existants décrits ci-dessus et il est autonome en énergie ce qui permet d'avoir un dispositif portable adapté à des interventions par un opérateur à pieds ou à des mesures occasionnelles. De plus, le dispositif met en œuvre un traitement numérique des signaux dès la sortie du photo-détecteur. Le traitement du signal qui suit se fait numériquement au niveau spectral et non directement sur le signal. Ainsi, la durée d'une mesure est courte relativement à la durée de mesure des systèmes de l'art antérieur. Typiquement la durée d'une mesure est de 1 à quelques secondes pour une fibre de 10Km.

[0015] Un autre objet de l'invention consiste à proposer un procédé de traitement numérique d'un signal issu dudit dispositif optoélectronique de mesure répartie par diffusion Brillouin.

[Brève description de l'invention]

[0016] A cet effet, l'invention a pour objet un dispositif optoélectronique de mesure répartie par diffusion Brillouin, ledit dispositif comprenant une source de lumière continue émettant un signal lumineux continu à une première fréquence  $\nu_0$ , un coupleur apte à diviser ledit signal lumineux continu en deux signaux identiques répartis dans deux bras, le premier bras comprenant un dispositif générateur d'impulsions décalées en fréquence comportant au moins un modulateur acousto-optique apte à transformer ledit signal continu en un signal impulsionnel, de fréquence  $\nu_p$ , destiné à être injecté dans une fibre optique à tester pour qu'elle émette en retour un signal par rétrodiffusion Brillouin spontanée à une fréquence  $\nu_F$  égale à  $\nu_p + \nu_{Bz}$ , où  $\nu_{Bz}$  est la fréquence Brillouin à mesurer en tout point  $z$  de ladite fibre optique, et le deuxième bras formant un oscillateur local émettant un autre signal lumineux destiné à être mélangé audit

signal retour émis par rétrodiffusion Brillouin par ladite fibre optique à tester pour permettre un abaissement de la fréquence dudit signal retour, de manière à ce qu'un module de détection puisse détecter ladite fréquence de décalage Brillouin  $\nu_{Bz}$  en tout point  $z$  de ladite fibre optique et qu'un module de traitement puisse relier cette

5 fréquence de décalage Brillouin  $\nu_{Bz}$  en tout point  $z$  de ladite fibre optique à une valeur de température et une valeur de déformation, **ledit dispositif étant** principalement **caractérisé en ce que** l'oscillateur local comprend une fibre optique de référence ayant une fréquence de Brillouin identique ou proche de celle de la fibre optique à tester, ladite fibre optique de référence émettant un signal par rétrodiffusion Brillouin

10 spontanée, en réponse audit signal lumineux continu émis dans ledit deuxième bras par ladite source lumineuse, ledit signal de rétrodiffusion Brillouin étant émis à une fréquence  $\nu_{OL} = \nu_0 - \nu_{BRef}$ , où  $\nu_{BRef}$  est la fréquence de Brillouin de la fibre de référence sans déformation et à une température de référence.

[0017] Ainsi, le dispositif selon l'invention permet de s'affranchir de tous les contrôles

15 préalables nécessaires lorsque l'on utilise un oscillateur local présentant une configuration de laser en anneau Brillouin. En effet, dans la configuration selon l'invention, le signal retour émis par la fibre de référence est un signal de diffusion spontanée amplifiée, et non le produit d'une résonance dans une cavité de type laser (qui dépendrait fortement de la longueur exacte de la cavité, difficile à maîtriser en

20 fonction de paramètres d'influence comme la température).

[0018] Selon d'autres caractéristiques optionnelles du dispositif :

- la fibre optique de référence a une fréquence de Brillouin identique ou une fréquence proche de celle de la fibre optique à tester à savoir présentant un écart de fréquence, inférieur à 50MHz et de façon préféré un écart inférieur à

25 20MHz.

- le dispositif selon l'invention comporte en outre :
  - un coupleur à au moins deux entrées pour recevoir le signal rétrodiffusé en sortie du circulateur et le signal provenant de l'oscillateur local et réaliser leur mélange,

30 • un brouilleur de polarisation disposé en amont des entrées du coupleur, le module de détection comprend d'une part un photo-détecteur limitant la bande

passante à moins de 1 GHz, de préférence à moins de 500 MHz, et de préférence dans une bande centrée autour de 200MHz, capable de détecter un battement entre le signal rétrodiffusé issu de la fibre optique à tester et le signal rétrodiffusé issu de la fibre optique de référence, et un convertisseur analogique

5 - numérique apte à numériser ledit battement détecté par ledit photo-détecteur.

- le dispositif comprend également un filtre électrique basse fréquence disposé entre le coupleur et le photo-détecteur. Ce filtre permet de diminuer le bruit basse fréquence et ainsi améliorer le rapport signal à bruit,

10 - le modulateur acousto-optique avec décalage de fréquence supérieur à 100MHz et de préférence un décalage de 200Mhz à 300 MHz.

- le module de traitement est un module de traitement numérique apte à utiliser un algorithme de transformée de Fourier rapide (FFT) pour calculer la fréquence de Brillouin en tout point z de ladite fibre optique à tester, puis à moyennner les spectres obtenus dans le domaine fréquentiel pour chaque point z de ladite fibre afin de déterminer la mesure répartie de la variation fréquentielle tout le long de

15 ladite fibre.

- Avantageusement le dispositif est embarqué et alimenté en basse tension, typiquement en 12 ou 24 Volts, à partir d'une batterie. Le dispositif est ainsi aisément portable et peut être utilisé pour des opérations effectuées par des

20 opérateurs à pieds ou des mesures occasionnelles.

[0019] L'invention a également pour objet un procédé de traitement numérique d'un signal issu d'un dispositif optoélectronique de mesure répartie par diffusion Brillouin décrit précédemment, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

25 - numériser un signal correspondant au battement entre un signal rétrodiffusé issu d'une fibre optique (5) à tester et un signal rétrodiffusé issu d'une fibre optique (18) de référence, et détecté par un photo-détecteur (9),

- découper ledit signal numérisé en une pluralité de tronçons (T1...Ti...TN) par application d'une fenêtre temporelle glissante de type fenêtre rectangulaire ou de Hamming, ou de Hann ou de Blackman-Harris, chaque tronçon présentant

30 une largeur égale à la largeur temporelle d'une demi impulsion du signal impulsionnel injecté dans la fibre optique à tester, la largeur de chaque tronçon

étant en outre centrée autour d'une date  $t$  correspondant à un point de coordonnée  $z$  de ladite fibre optique à tester,

- calculer, par utilisation d'un algorithme de transformée de fourrier rapide FFT, le spectre fréquentiel de chaque tronçon ( $T_1 \dots T_i \dots T_N$ ) dudit signal numérisé;
- 5 - répéter les étapes a, b et c et moyenner les spectres obtenus pour chaque point  $z$  de ladite fibre optique à tester ;
- à l'aide des résultats obtenus à l'étape précédente, tracer un graphe de la variation de fréquence répartie mesurée en fonction du temps aller et retour  $t_z$  de rétrodiffusion,
- 10 - appliquer un coefficient de sensibilité à la température d'une part et un coefficient de sensibilité à la déformation d'autre part, sur ledit graphe obtenu de variation de fréquence répartie mesurée, afin d'obtenir respectivement un résultat en termes de mesure répartie en température ou un résultat en termes de mesure répartie en déformation.
- 15 - Avantageusement le traitement numérique est réalisé par un processeur graphique de type GPU (*Graphical Processing Unit*), car cet algorithme est hautement parallélisable à savoir que le même calcul est réalisé de nombreuses fois sur des portions différentes de signal.
- 20 [0020] D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaitront à la lecture de la description suivante donnée à titre d'exemple illustratif et non limitatif, en référence aux Figures annexées qui représentent :
  - La Figure 1, déjà décrite, un schéma d'un dispositif optoélectronique de mesure répartie par rétrodiffusion Brillouin selon l'art antérieur,
  - 25 • La Figure 2, un schéma d'un dispositif optoélectronique de mesure répartie par rétrodiffusion Brillouin selon l'invention,
  - Les Figures 3A à 3E, des traces temporelles ou spectrales obtenues à chaque étape du procédé de traitement numérique du signal numérisé, obtenu après recombinaison des signaux rétrodiffusés par la fibre optique sous test et par la
  - 30 fibre optique de référence.

- Les Figures 4A à 4C présentent des mesures réelles réalisées à partir du dispositif de l'invention,
  - La Figure 5 présente l'ensemble des spectres de diffusion Brillouin sur une fibre de longueur d'environ 250m.
- 5     • La Figure 6 présente le résultat de mesure répartie, i.e. l'ensemble des maxima des spectres de la figure 5.

[Description détaillée de l'invention]

[0021] On désigne par fibre à tester (ou sous test) dans la suite, la fibre optique disposée le long d'un ouvrage à surveiller et qui permet de réaliser une mesure répartie.

10 [0022] On entend par fibre de référence, une fibre ayant une fréquence de Brillouin identique ou proche de la fréquence de Brillouin de la fibre test. Le terme fibre à fréquence de Brillouin proche désigne une fibre dont la fréquence de Brillouin présente un écart de fréquence avec la fréquence de Brillouin de la fibre test, inférieur à 50MHz et de façon préféré un écart inférieur à 20MHz.

15 [0023] On entend par durée d'une mesure le temps nécessaire au système pour afficher une mesure à la précision nominale (en termes de déformation ou température). Cette durée inclut à la fois :

- le temps d'acquisition,
- le temps de calcul du système (Transformées de fourrier, moyennages...)

20

[0024] La présente invention se rapporte d'une façon générale aux dispositifs optoélectroniques de mesure répartie par diffusion Brillouin dans une fibre optique. L'invention concerne plus précisément une configuration optoélectronique du dispositif permettant de diminuer sa consommation électrique et de réduire son encombrement.

25 [0025] L'utilisation des mesures renvoyées par ce dispositif est consacrée à l'optimisation de la maintenance d'ouvrages de génie-civil. La continuité des mesures le long de la fibre optique garantie la détection d'un évènement qui ne l'aurait pas été par un autre procédé utilisant des mesures ponctuelles et localisées. La détection précoce des désordres structuraux dans des ouvrages de génie civil permet une

30 intervention avant une dégradation plus importante. A l'inverse, l'absence de détection

peut permettre de retarder les opérations de maintenance systématique si elles ne sont pas nécessaires. Dans les deux cas, un tel dispositif optoélectronique de mesure répartie par rétrodiffusion Brillouin permet à un exploitant de réaliser des économies significatives sur la maintenance des ouvrages de génie-civil.

5 [0026] La Figure 2 schématise plus particulièrement la configuration d'un tel dispositif optoélectronique de mesure répartie par diffusion Brillouin dans une fibre optique, selon l'invention. Les mêmes références que sur la Figure 1 sont utilisées pour désigner les mêmes éléments. Le dispositif selon l'invention comprend également une source lumineuse 1 émettant un signal lumineux continu. Cette source de lumière 1 est  
10 avantageusement matérialisée par un laser, de préférence un laser DFB (de l'acronyme anglais « Distributed Feedback »), utilisant un réseau de Bragg. La longueur d'onde d'émission  $\lambda_0$  est de préférence égale à 1550nm, à la fréquence correspondante  $\nu_0$ . La raie de l'onde lumineuse émise est centrée sur la longueur d'onde d'émission  $\lambda_0$  et sa largeur est au plus de 1 MHz. Le laser 1 émet un signal  
15 lumineux continu moyennement puissant, typiquement de l'ordre de 20mW, dans une fibre optique le reliant au coupleur 2. Le coupleur 2 permet de diviser le signal lumineux incident émis par le laser 1, en deux signaux identiques répartis dans deux bras du dispositif.

[0027] Le premier bras, encore dénommé « pompe », comprend un dispositif  
20 générateur d'impulsions décalées en fréquence 30. Ce dispositif 30 comporte au moins un modulateur acousto-optique 3. Il peut comporter également un ou plusieurs amplificateurs si nécessaire pour donner du gain. Le modulateur 3 acousto-optique transforme le signal continu de fréquence  $\nu_0$  en un signal impulsionnel de fréquence  $\nu_p = \nu_0 + \nu_A$ , où  $\nu_A$  est la fréquence propre au modulateur 3, et est généralement supérieure  
25 ou égale à 100 et inférieure ou égale à 500 MHz, de préférence de l'ordre de 200MHz. La largeur temporelle de l'impulsion ainsi générée est comprise entre 10ns et 50ns, de préférence elle est de 20ns. Le signal impulsionnel est alors dirigé vers un circulateur 4 qui l'injecte ensuite dans la fibre optique 5 à tester, sur laquelle doit être effectuée la mesure répartie. Au passage du signal impulsionnel, la fibre optique 5 émet en sens  
30 inverse un signal par rétrodiffusion Brillouin spontanée à la fréquence  $\nu_F = \nu_0 + \nu_A + \nu_{Bz}$ ;  $\nu_{Bz}$  étant la fréquence Brillouin à mesurer en tout point de coordonnée  $z$  le long de la fibre optique 5. Ce signal rétrodiffusé est dirigé par le circulateur 4 vers le coupleur 8

où il est recombinaé avec un signal provenant de l'oscillateur local formant le deuxièéme bras du dispositif.

[0028] L'oscillateur local 16, comprend avantageusement un circulateur 17 qui dirige le signal lumineux continu incident, à la fréquence  $\nu_0$ , provenant du laser 1, dans une fibre optique 18 de référence. Cette fibre optique de référence 18 est avantageusement identique à la fibre optique 5 sous test. La fibre de référence 18 n'est soumise à aucune déformation. Elle est placée à une température de référence, en général comprise entre 18 et 25°C, de préférence à une température de l'ordre de 20°C. Cette fibre de référence 18 permet elle aussi d'émettre un signal par rétrodiffusion Brillouin en réponse au signal continu émanant de la source lumineuse 1, de sorte que l'oscillateur local 16 permet de transformer la fréquence incidente  $\nu_0$  en une fréquence  $\nu_{0L} = \nu_0 + \nu_{Bref}$ , où  $\nu_{Bref}$  représente la fréquence Brillouin de la fibre optique 18 de référence, et qui se situe dans la même gamme de fréquence que la fréquence  $\nu_{Bz}$  issue du signal rétrodiffusé par la fibre optique 5 en test. La fréquence Brillouin de la fibre optique de référence se situe donc dans une gamme de fréquence autour de 11 GHz, en général entre 10,5 et 11,5 GHz. Le circulateur 17 de l'oscillateur local 16 envoie alors le signal rétrodiffusé vers le coupleur 8 pour le mélanger avec le signal rétrodiffusé en provenance de la fibre optique 5 sous test.

[0029] Les signaux issus de la fibre optique 5 sous test et de la fibre optique de référence 18 sont donc recombinaés dans le coupleur 8. A la sortie du coupleur 8, on obtient un signal qui contient un battement entre le signal provenant de la fibre optique 5 sous test et de la fibre optique de référence 18 de l'oscillateur local 16. Ce battement, de plus basse fréquence, est détectable électriquement grâce à l'utilisation d'un photo-détecteur 9, de bande passante inférieure à 1GHz, de préférence 500MHz. En sortie du photo-détecteur 9 on obtient donc un signal électrique correspondant au battement détecté à la fréquence de  $\nu_{Batt} = \nu_A + (\nu_{Bz} - \nu_{Bref})$ . Le battement présente une fréquence plus faible que les signaux incidents du fait que la fréquence  $\nu_0$  issue de la source lumineuse 1 est éliminée. Typiquement, le battement présente une fréquence inférieure à 500MHz, et de préférence autour de 200MHz, correspondant à l'ordre de grandeur de la fréquence propre au modulateur acousto-optique 3.

[0030] Le signal de battement obtenu est alors numérisé, au moyen d'un module convertisseur analogique – numérique 11. Puis il est traité par un module 12 de traitement numérique.

5 [0031] La configuration avantageuse de l'oscillateur local 16 selon l'invention permet de s'affranchir de tous les contrôles préalables nécessaires lorsque l'on utilise un laser en anneau Brillouin afin d'éviter des perturbations sur le signal (par instabilité de cavité laser). Il permet en outre de réduire la fréquence à détecter par le photo-détecteur à moins de 500MHz, et plus particulièrement dans une bande de fréquences centrée autour de 200 MHz. La configuration optique permet donc d'augmenter le rendement  
10 du photo-détecteur 9 en limitant la bande passante à moins de 1 GHz au lieu de 11GHz, de préférence à 500 MHz.

[0032] Le module 12 de traitement numérique, quant à lui, utilise avantageusement un algorithme de transformé de fourrier rapide FFT, au moyen par exemple d'un circuit intégré logique connu sous l'acronyme anglais FPGA (pour « Field Programmable gate  
15 array »). Il permet ainsi de calculer directement la fréquence Brillouin en tout point de coordonnée z de la fibre optique 5 sous test. Le module 12 de traitement numérique permet en outre de moyennner les spectres obtenus dans le domaine fréquentiel, pour chaque point z de ladite fibre, à l'issue de l'application de l'algorithme de transformée de fourrier rapide FFT, afin de déterminer la mesure répartie de la variation fréquentielle  
20 tout le long de ladite fibre optique 5 sous test.

[0033] Les différentes étapes du traitement numérique effectué sur le signal numérisé, sont plus particulièrement illustrées par les Figures 3 A à 3E expérimentales et explicatives qui représentent des traces temporelles ou spectrales obtenues à chaque  
25 étape du procédé de traitement numérique du signal numérisé, obtenu après recombinaison des signaux rétrodiffusés par la fibre optique sous test et par la fibre optique de référence.

[0034] La Figure 3A représente le signal numérisé en sortie du convertisseur analogique – numérique 11.

30 [0035] Une première étape du traitement numérique effectué par le module de traitement numérique 12, consiste à découper le signal numérisé en tronçons. Le découpage en tronçon est réalisé par application d'une fenêtre temporelle glissante sur le signal. De préférence le fenêtrage est réalisé par une fenêtre rectangulaire ou de

Hamming ou de Hann ou de Blackman-Harris. Le découpage du signal numérisé est représenté sur la Figure 3B, un premier tronçon à traiter étant repéré par la référence T1 et le tronçon N, dans lequel se situe la zone de l'évènement à mesurer, étant repéré par la référence TN. Chaque tronçon présente une largeur égale à la largeur temporelle d'une demi-impulsion du signal impulsionnel injecté dans la fibre optique à tester. Chaque tronçon T1...Ti... TN est en outre centré autour d'une date  $t_1, \dots, t_i, \dots, t_N$  correspondant à un point de coordonnée  $z$  de ladite fibre optique à tester. Ainsi, pour une position de coordonnée  $z$  sur la fibre optique 5,  $z = v \cdot t_z$ , avec  $v = c/(2 \cdot n)$ , où  $n$  est l'indice de réfraction de la fibre optique,  $c$  est la vitesse de la lumière,  $v$  est la fréquence de l'onde optique, et le temps  $t_z$  correspond alors au temps aller-retour ( $z$ ) d'une impulsion, décompté à partir du point de départ de l'impulsion jusqu'au point  $z$  de mesure.

[0036] L'écart entre deux points de mesure peut être aussi petit que 1 unité d'échantillonnage (glissement d'un intervalle). Cependant l'écart entre 2 mesures indépendantes (résolution spatiale) est considéré comme égal à la demi-largeur de l'impulsion. Ainsi, l'écart entre 2 points de mesure indépendants  $z(t_1), z(t_2)$  est égal à la largeur d'une demi impulsion.

[0037] Une deuxième étape du traitement numérique consiste ensuite calculer, par utilisation d'un algorithme de transformée de fourrier rapide FFT, le spectre de chaque tronçon T1...Ti... TN dudit signal numérisé. Ainsi, pour chaque tronçon T1...Ti... TN du signal numérisé on obtient un spectre fréquentiel. De tels spectres fréquents sont illustrés sur la Figure 3C pour les tronçons T1 et TN du signal découpé de la Figure 3B. Ces spectres fréquents permettent d'obtenir la fréquence du battement  $v_{Batt} = v_A + (v_{Bz} - v_{Bref})$  et de déterminer la fréquence maximum du battement correspondant à chaque tronçon T1...Ti... TN. Une troisième étape consiste à répéter les deux premières étapes de découpage et utilisation de l'algorithme de transformée de fourrier rapide, et à moyennner les résultats afin d'obtenir un spectre interprétable, c'est-à-dire dont on peut déterminer le maximum. Il s'agit de réaliser la moyenne des courbes FFT pour déterminer le maximum le plus précisément possible. On utilise par exemple un algorithme d'ajustement Gaussien ou de Lorentz. Cette étape peut être vue comme facultative mais les signaux traités étant bruités, elle est, dans la pratique, nécessaire.

[0038] La quatrième étape du traitement numérique consiste ensuite à déterminer les positions fréquentielles des maximas correspondant aux résultats des algorithmes d'ajustement, en fonction des coordonnées  $z$  des différents points de la fibre optique 5, et à tracer un graphe de la mesure répartie de variation de fréquence tout le long de la fibre optique 5. Un tel graphe est représenté sur la Figure 3D, sur lequel on observe une variation de fréquence à la durée  $t=500\text{ns}$ , correspondant à la zone d'évènement du tronçon TN de la Figure 3B.

[0039] Enfin, une dernière étape du traitement numérique consiste à appliquer les coefficients de sensibilité, respectivement de température  $C_T$  et de déformation  $C_\varepsilon$ , propres à la fibre optique 5, pour obtenir un résultat respectivement en termes de mesure répartie de température et de déformation. La Figure 3E représente un graphe obtenu après application du coefficient  $C_\varepsilon$  de sensibilité à la déformation et permettant d'obtenir la mesure répartie de déformation  $\varepsilon$  tout le long de la fibre optique. Ainsi, sur ce graphe, on constate que la fibre optique analysée est déformée de  $680\mu\text{m/m}$  au point  $z$  correspondant à la durée  $t$  de  $500\text{ns}$ . Le coefficient  $C_\varepsilon$  de sensibilité à la déformation est typiquement de  $0,05\text{MHz}/(\mu\text{m/m})$  et le coefficient de sensibilité à la température  $C_T$  est typiquement  $1\text{MHz}/^\circ\text{C}$ .

[0040] Les Figures 4A à 4C présentent des mesures réelles réalisées à partir de l'invention.

[0041] La figure 4A montre une trace temporelle acquise directement à la sortie du photo-détecteur. Celle-ci présente une modulation aléatoire (contrairement à la figure 3A, explicative), mais contient, comme le montre la figure 4B, une composante quasi-sinusoidale correspondant à la diffusion Brillouin. La figure 4C montre que le spectre moyenné de la portion temporelle, présentée en 4B, est tel que décrit dans par la figure explicative 2C. La Figure 5 présente l'ensemble des spectres de diffusion Brillouin sur une fibre de longueur d'environ  $250\text{m}$ . La Figure 6 présente le résultat de mesure répartie, à savoir, l'ensemble des maxima des spectres de la figure 5.

[0042] Les fibres utilisées sont des fibres monomodes typiquement des fibres G652 type Coring® - SMF-28™, d'indice typiquement 1.45, de diamètre de cœur  $9\mu\text{m}$ , gaine optique  $125\mu\text{m}$ , gaine mécanique  $250\mu\text{m}$ . La longueur peut être de moins d' $1\text{km}$ , jusqu'à plus de  $50\text{km}$ .

[0043] L'invention permet une suppression de tous les composants électroniques analogiques, excepté le photo-détecteur 9 et permet leur remplacement par un numériseur 11 et un module de traitement numérique 12. Ainsi, on s'affranchit des niveaux de bruit apportés par les composants actifs analogiques tels que les amplificateurs ou les oscillateurs par exemple. De plus, le traitement du signal étant entièrement numérique, les traitements sont moins consommateurs d'énergie et le dispositif présente un encombrement réduit, si bien qu'il peut être embarqué. Il peut donc avantageusement être alimenté en basse tension, typiquement en 12 ou 24 Volts, à partir d'une batterie. Cette batterie peut en outre être rechargeable, par un panneau solaire isolé par exemple, dont le besoin de puissance est de l'ordre de 100 Watt continu.

[0044] De plus le dispositif permet d'utiliser un module de calcul numérique 12 permettant d'effectuer des traitements en parallèle pour chaque tronçon ce qui réduit le temps de mesure à la durée d'acquisition, par exemple pour 10km de fibre on pourra avoir 10000 acquisitions par seconde avec une fréquence d'horloge du processeur de 10KHz et ainsi obtenir 10000 moyennes. Le module de calcul numérique comporte avantageusement processeur graphique de type GPU (Graphical Processing Unit) afin de déporter le calcul hautement parallélisable sur celui-ci. Ainsi, le calcul est réalisé en parallèle de l'acquisition et la durée d'une mesure correspond au temps d'acquisition. Ce temps d'acquisition est faible par rapport au temps d'acquisition des dispositifs de l'art antérieur. A titre d'exemple, pour une fibre de 10km, avec une fréquence d'horloge du processeur de 10Khz, on réalise 10000 acquisitions en une seconde ce qui permet d'avoir 10000 moyennes alors que dans l'état de la technique la durée d'une mesure est supérieure à une minute pour 10km.

## REVENDEICATIONS

1. Procédé de traitement numérique d'un signal issu d'un dispositif optoélectronique de mesure répartie par diffusion Brillouin comprenant une source de lumière (1) continue émettant un signal lumineux continu à une première fréquence  $\nu_0$ , un coupleur (2) apte à diviser ledit signal lumineux continu en deux signaux identiques répartis dans deux bras, le premier bras comprenant un dispositif générateur d'impulsions décalées en fréquence (30) comprenant au moins un modulateur acousto-optique (3) apte à transformer ledit signal continu en un signal impulsionnel, de fréquence  $\nu_p$ , destiné à être injecté dans une fibre optique (5) à tester pour qu'elle émette en retour un signal par rétrodiffusion Brillouin spontanée à une fréquence  $\nu_F$  égale à  $\nu_p + \nu_{Bz}$ , où  $\nu_{Bz}$  est la fréquence Brillouin à mesurer en tout point  $z$  de ladite fibre optique (5), et le deuxième bras formant un oscillateur local (16) émettant un autre signal lumineux destiné à être mélangé audit signal retour émis par rétrodiffusion Brillouin par ladite fibre optique (5) à tester pour permettre un abaissement de la fréquence dudit signal retour, de manière à ce qu'un module de détection (9) puisse détecter ladite fréquence de décalage Brillouin  $\nu_{Bz}$  en tout point  $z$  de ladite fibre optique et qu'un module de traitement (12) puisse relier cette fréquence de décalage Brillouin  $\nu_{Bz}$  en tout point  $z$  de ladite fibre optique à une valeur de température et une valeur de déformation, dans lequel l'oscillateur local (16) comprend une fibre optique de référence (18) ayant une fréquence de Brillouin identique ou proche de celle de la fibre optique (5) à tester, ladite fibre optique de référence (18) émettant un signal par rétrodiffusion Brillouin spontanée, en réponse audit signal lumineux continu émis dans ledit deuxième bras par ladite source lumineuse (1), ledit signal de rétrodiffusion Brillouin étant émis à une fréquence  $\nu_{OL} = \nu_0 - \nu_{BRef}$ , où  $\nu_{BRef}$  est la fréquence de Brillouin de la fibre de référence sans déformation et à une température de référence ; **caractérisé en ce que le procédé comporte les étapes suivantes :**

- a) numériser un signal correspondant au battement entre un signal rétrodiffusé issu d'une fibre optique (5) à tester et un signal rétrodiffusé issu d'une fibre optique (18) de référence, et détecté par un photo-détecteur (9),
- b) découper ledit signal numérisé en une pluralité de tronçons ( $T_1 \dots T_i \dots T_N$ ) par application d'une fenêtre temporelle glissante de type fenêtre rectangulaire ou de Hamming, ou de Hann ou de Blackman-Harris, chaque tronçon présentant une largeur égale à la largeur temporelle d'une demi impulsion du signal impulsionnel injecté dans la fibre optique (5) à tester, la largeur de chaque tronçon étant en outre centrée autour d'une date  $t$  correspondant à un point de coordonnée  $z$  de ladite fibre optique (5) à tester,

- c) calculer, par utilisation d'un algorithme de transformée de fourrier rapide FFT, le spectre fréquentiel de chaque tronçon ( $T_1 \dots T_i \dots T_N$ ) dudit signal numérisé;
- d) répéter les étapes a), b) et c) et moyenner les spectres obtenus pour chaque point  $z$  de ladite fibre optique à tester ;
- 5 e) à l'aide des résultats obtenus à l'étape précédente, tracer un graphe de la variation de fréquence répartie mesurée en fonction du temps aller et retour  $t_z$  de rétrodiffusion,
- f) appliquer un coefficient de sensibilité à la température d'une part et un coefficient de sensibilité à la déformation d'autre part, sur ledit graphe obtenu de variation de fréquence répartie mesurée, afin d'obtenir respectivement un
- 10 résultat en termes de mesure répartie en température ou un résultat en termes de mesure répartie en déformation.

2. Procédé de traitement numérique selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit traitement numérique est réalisé par un processeur graphique de type GPU (*Graphical Processing Unit*) en parallèle de l'acquisition.

15

3. Procédé de traitement numérique selon la revendication 1, pour lequel, la fibre optique de référence (18) a une fréquence de Brillouin identique ou une fréquence proche de celle de la fibre optique (5) à tester à savoir présentant un écart de fréquence, inférieur à 50MHz et de façon préférée un écart inférieur à 20MHz.

20

4. Procédé de traitement numérique selon la revendication 1, pour lequel:

- La bande passante du battement est limitée à moins de 1GHz, de préférence à moins de 500 MHz, et de préférence dans une bande centrée autour de 200MHz, par un photo-détecteur (9), capable de détecter ledit battement entre le signal rétrodiffusé issu de la fibre optique (5) à tester et le signal rétrodiffusé issu de la fibre optique (18) de référence,

25

- Le signal numérisé est le signal de battement détecté par ledit photo-détecteur (9), la numérisation étant faite par un convertisseur analogique – numérique (11)

30

5. Procédé de traitement numérique selon la revendication 1, pour lequel :

- le bruit d'intensité optique apporté par la diffusion Brillouin dans la fibre de référence est éliminé par un filtre électrique basse fréquence disposé entre le coupleur (8) et le photo-détecteur (9).

6. Procédé de traitement numérique selon la revendication 1, pour lequel :

- 5 - les impulsions sont décalées en fréquence par un décalage de fréquence supérieur à 100MHz et de préférence un décalage de 200MHz à 300MHz réalisé par le modulateur acousto-optique (3).

7. Procédé de traitement numérique selon la revendication 1, pour lequel :

- 10 - On réalise une alimentation en basse tension, typiquement en 12 ou 24 Volts, à partir d'une batterie, le dispositif optoélectronique de mesure répartie par diffusion Brillouin étant embarqué.

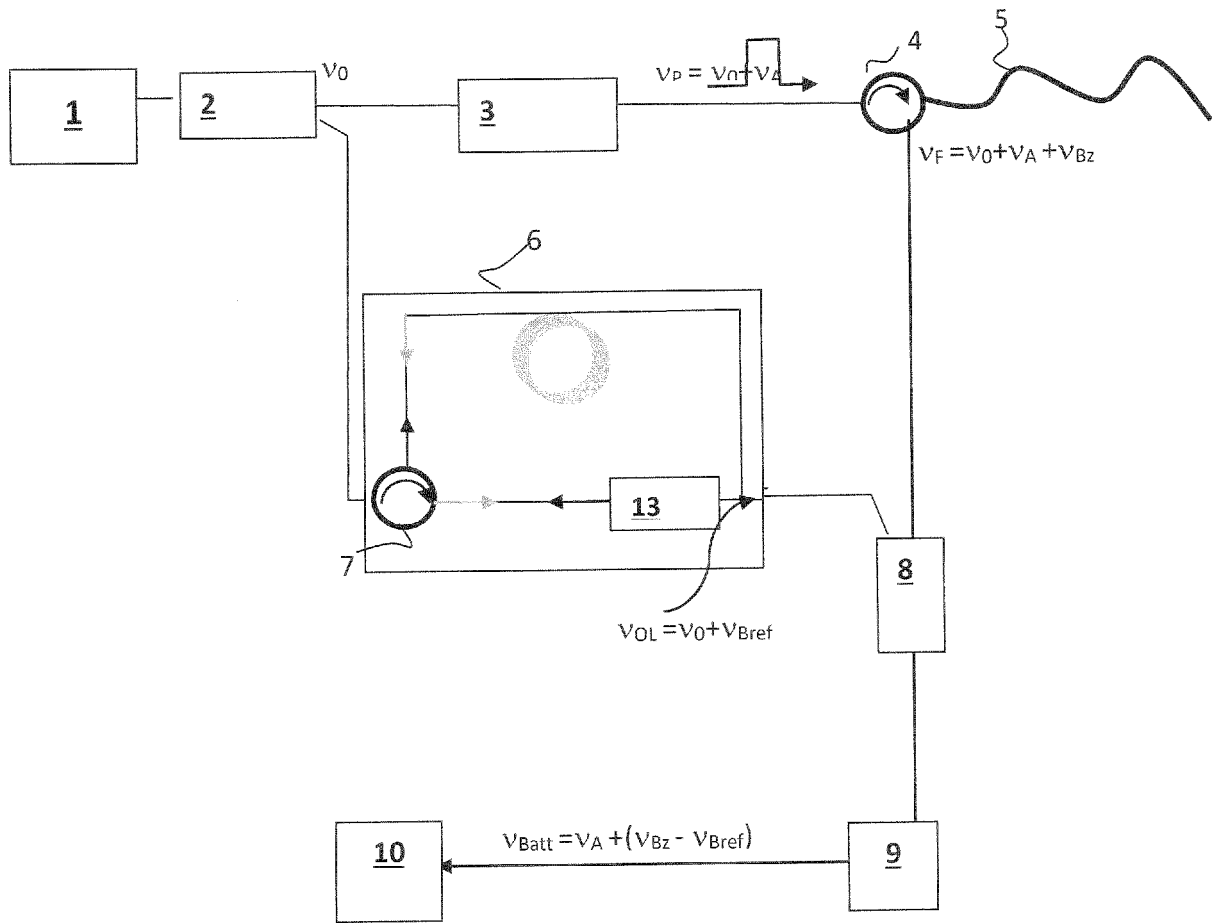


FIG. 1  
(Art Antérieur)

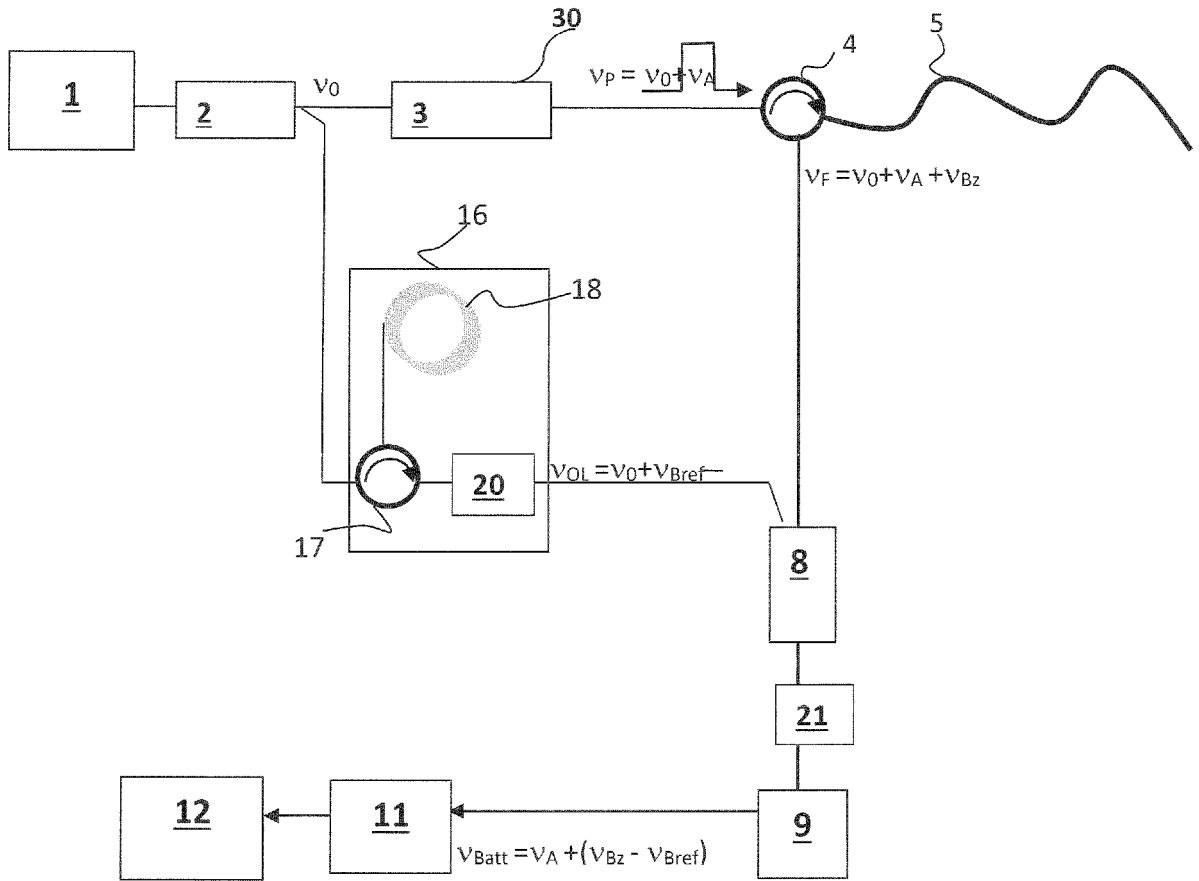


FIG. 2

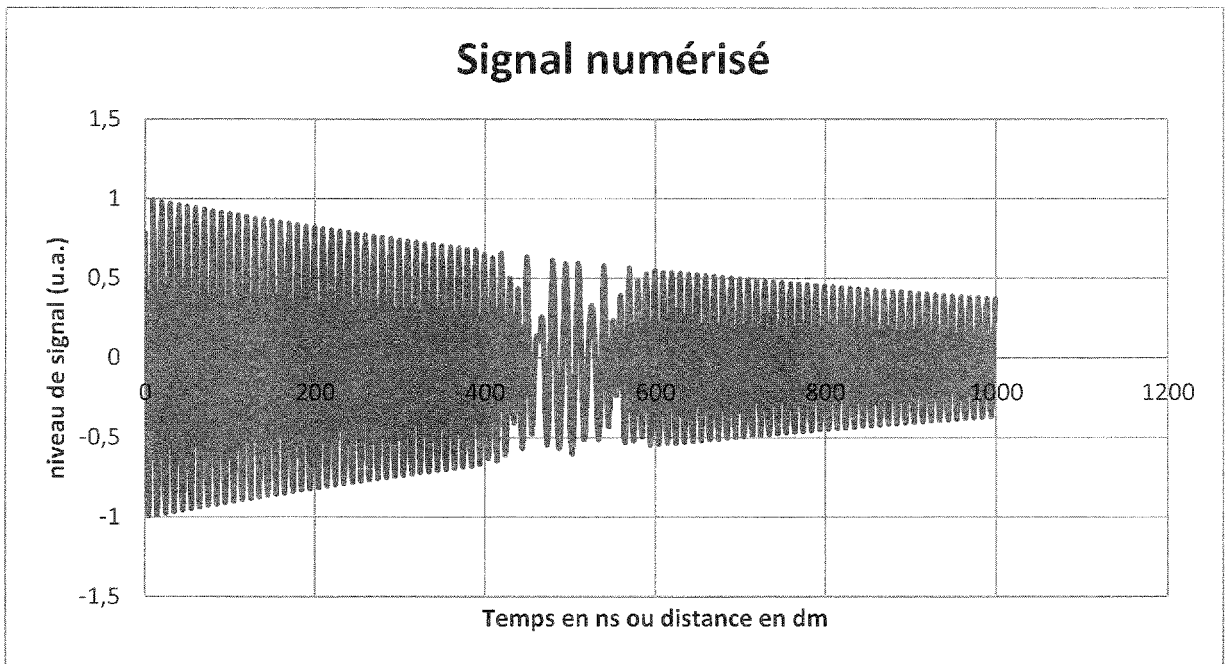


FIG. 3A

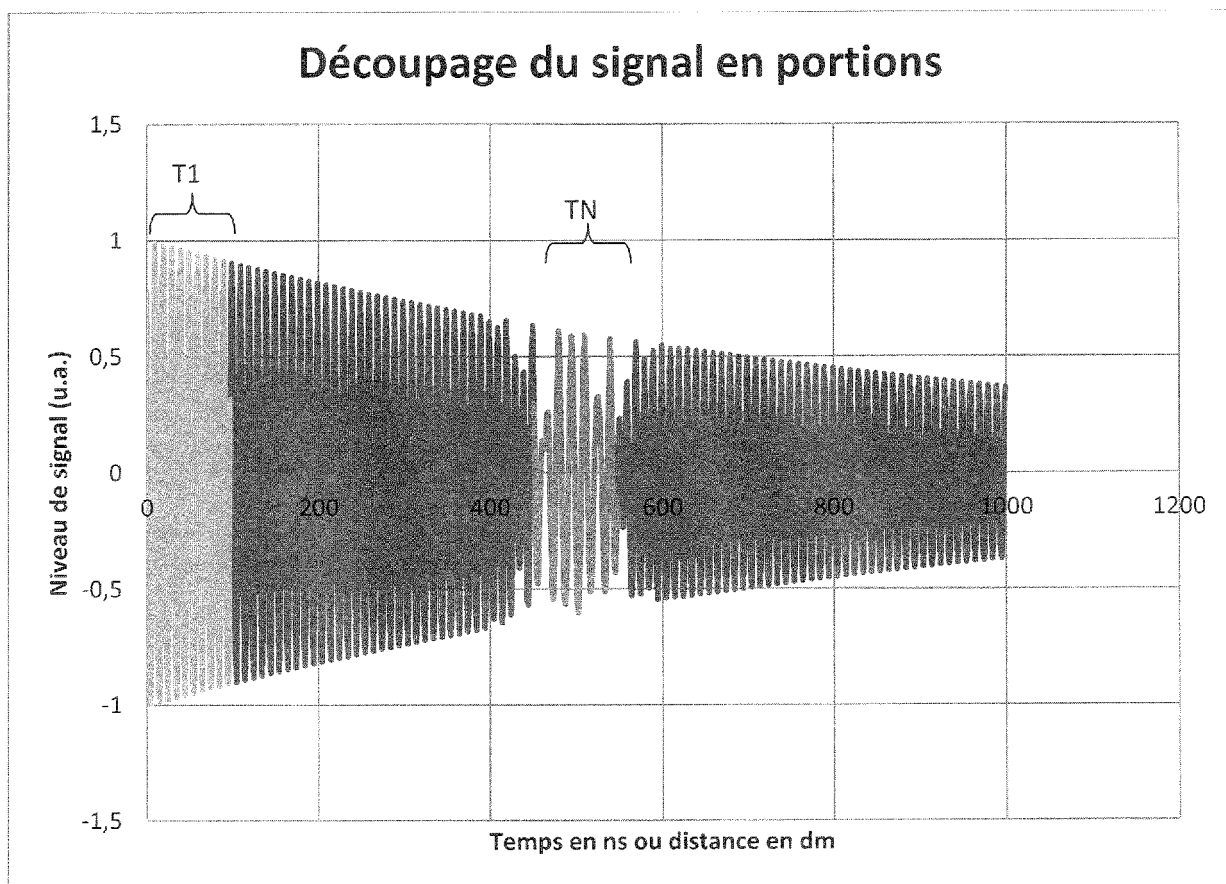


FIG.3B

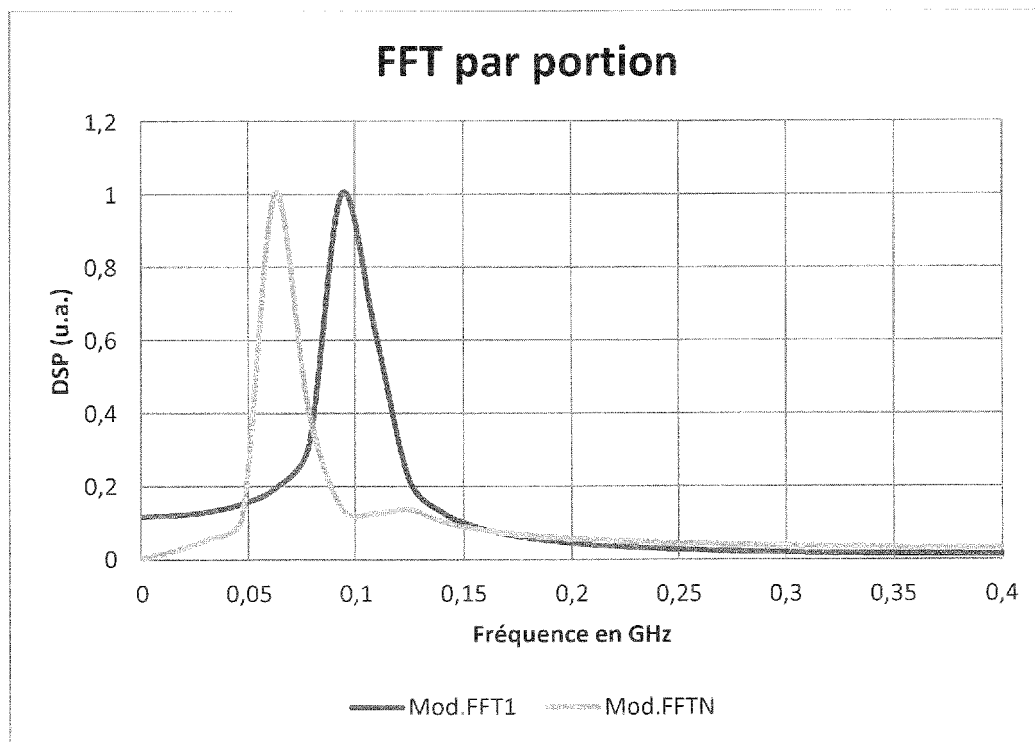


FIG.3C

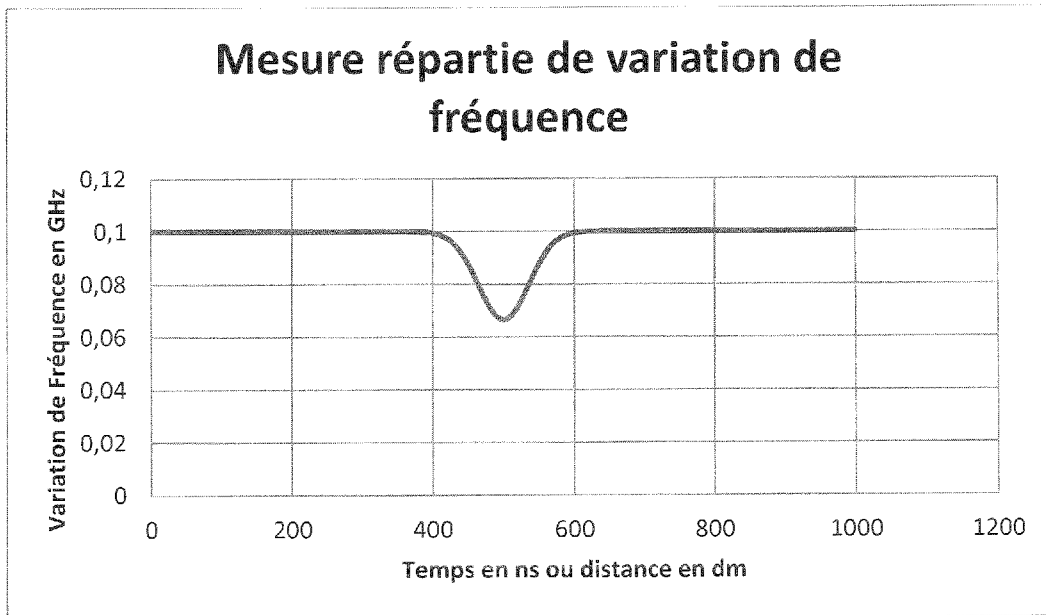


FIG.3D

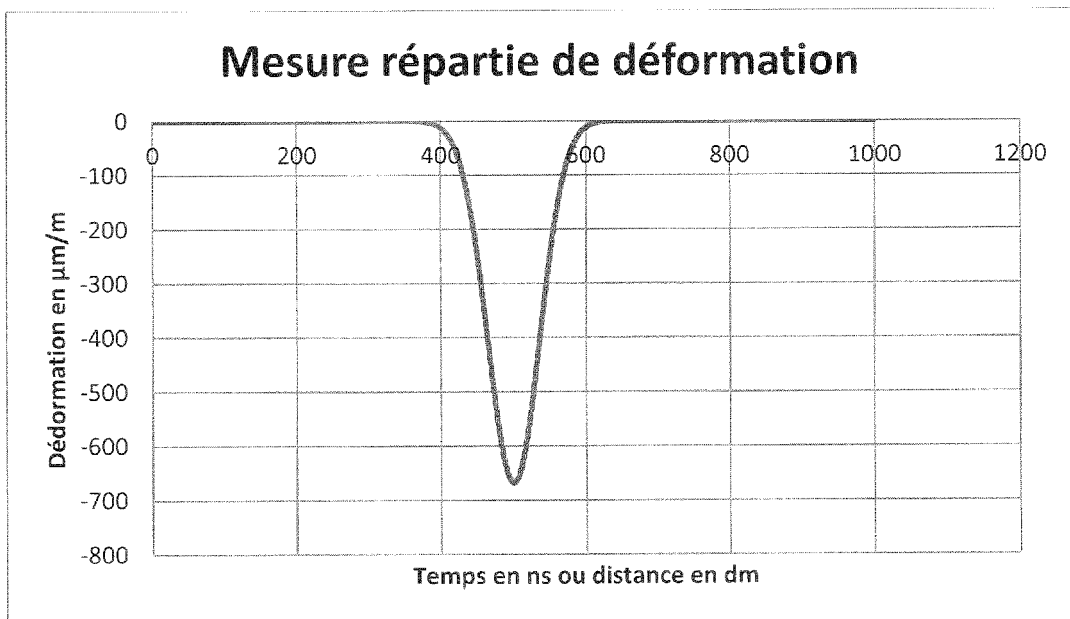


FIG.3E

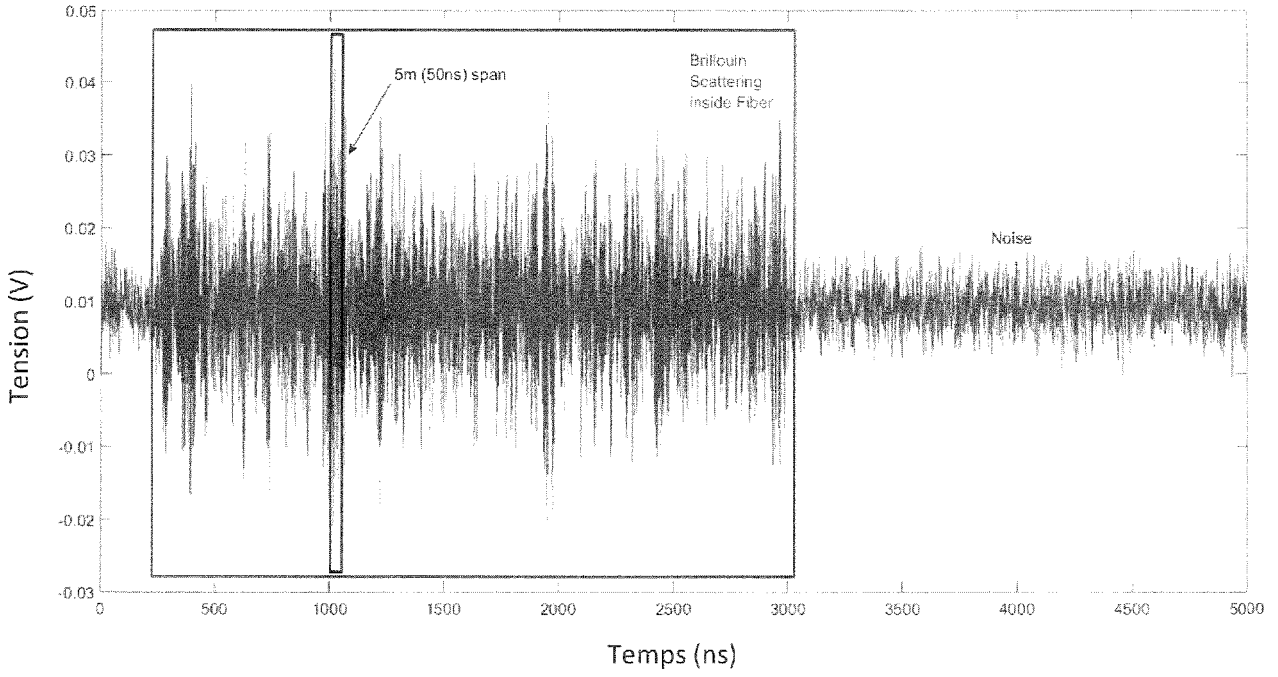


FIG.4A

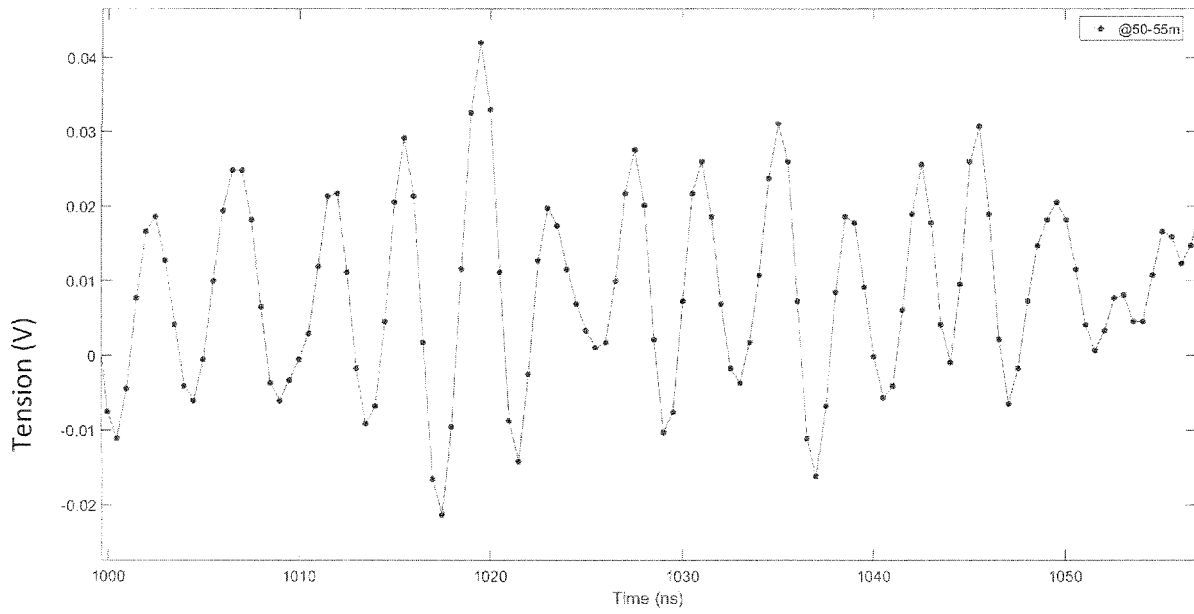


FIG. 4B

Temps (ns)

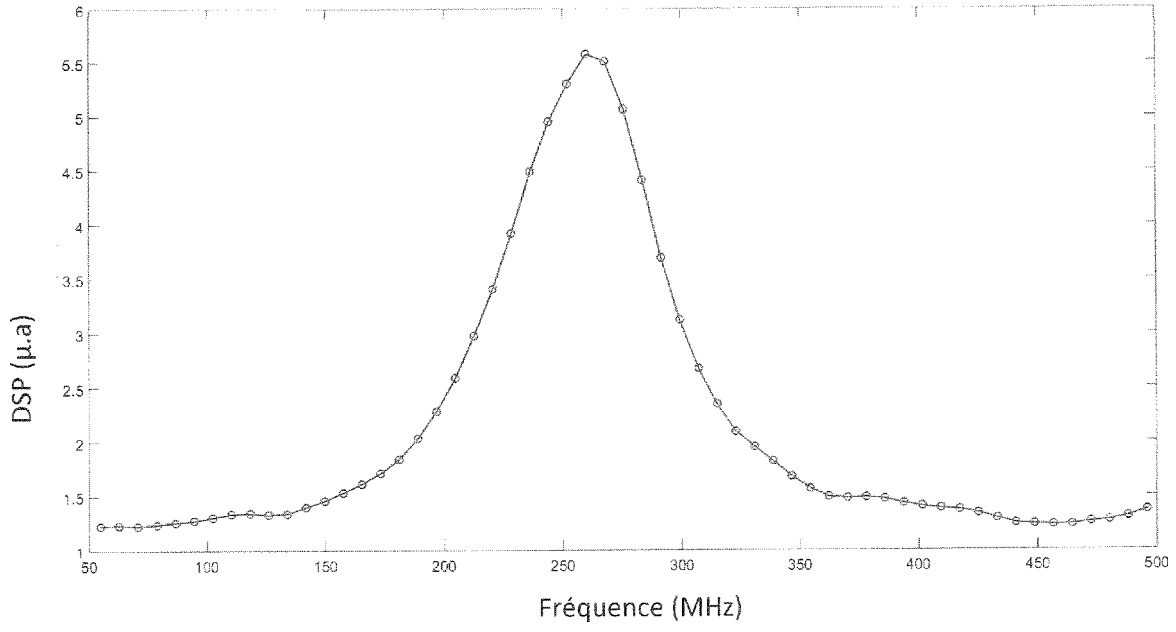


FIG. 4C

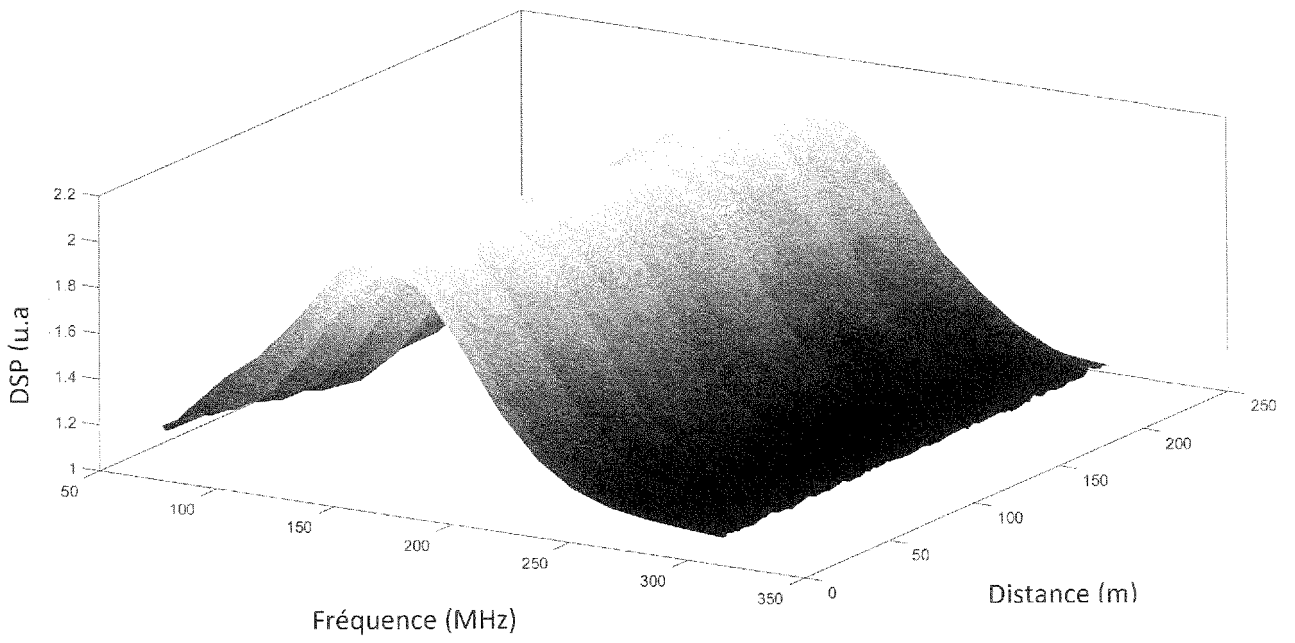


FIG. 5

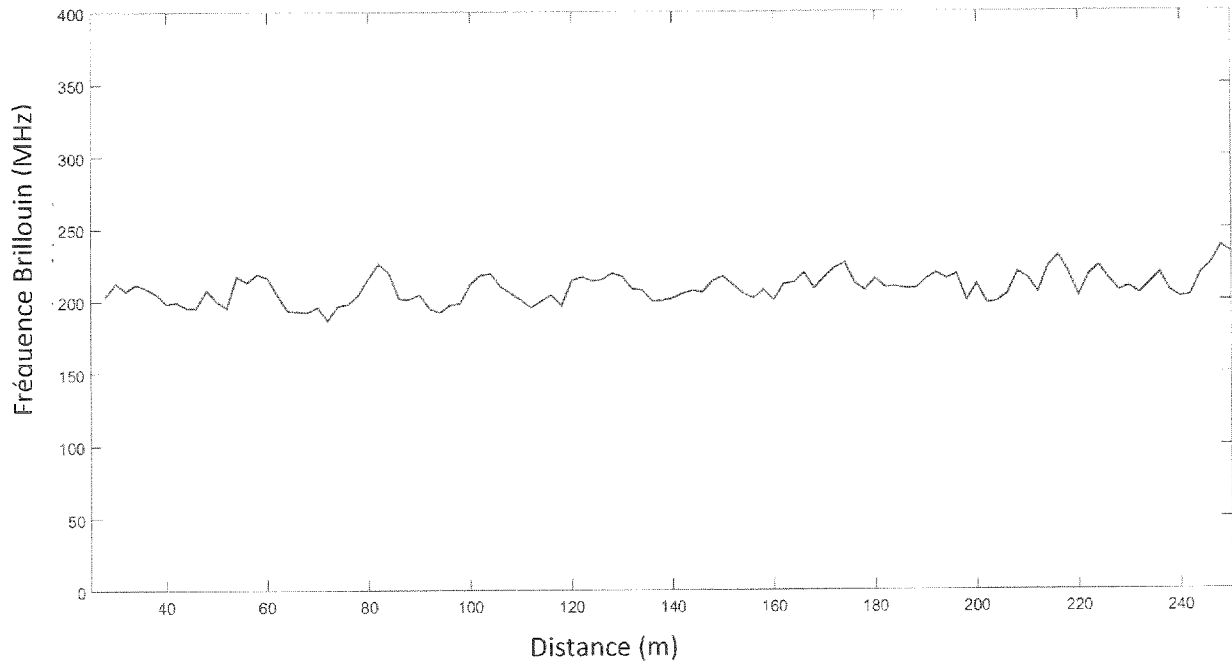


FIG. 6

# RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

---

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

**1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION**

NEANT

**2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL**

JP 2010 217029 A (NIPPON TELEGRAPH &amp; TELEPHONE) 30 septembre 2010 (2010-09-30)

DAISUKE LIDA ET AL: "Cost-effective bandwidth-reduced Brillouin optical time domain reflectometry using a reference Brillouin scattering beam", APPLIED OPTICS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC; US, vol. 48, no. 22, 21 juillet 2009 (2009-07-21), pages 4302-4309, XP001547153, ISSN: 0003-6935, DOI: 10.1364/AO.48.004302

YUGUO YAO ET AL: "Reducing Trade-Off Between Spatial Resolution and Frequency Accuracy in BOTDR Using Cohen's Class Signal Processing Method", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 24, no. 15, 5 juillet 2012 (2012-07-05), pages 1337-1339, XP011451590, ISSN: 1041-1135, DOI: 10.1109/LPT.2012.2203299

**3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES**

NEANT