

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 04.08.16.

(30) Priorité : 14.09.15 IB WOUS2015049977.

(71) Demandeur(s) : HALLIBURTON ENERGY SERVICES,
INC. — US.

(43) Date de mise à la disposition du public de la
demande : 17.03.17 Bulletin 17/11.

(72) Inventeur(s) : NUNES LEONARDO DE OLIVEIRA,
BARFOOT DAVID ANDREW, ELLMAUTHALER
ANDREAS, MARTINEZ YENNY NATALI et LAN
XINWEI.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : Ce dernier n'a pas été
établi à la date de publication de la demande.

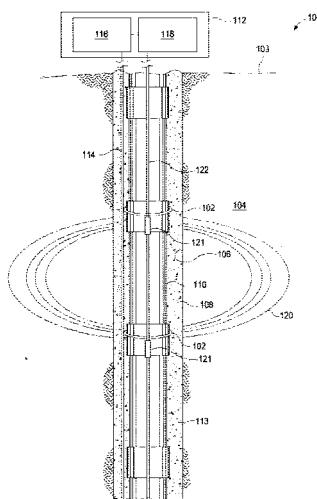
(73) Titulaire(s) : HALLIBURTON ENERGY SERVICES,
INC..

(60) Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

(74) Mandataire(s) : GEVERS & ORES Société anonyme.

(54) DETECTION DE DEFORMATION DANS DES CABLES A FIBRES OPTIQUES INDUITE PAR DES SIGNAUX A
BANDE ETROITE.

(57) Un procédé peut comprendre la transmission d'un signal à bande étroite dans une formation utilisant un émetteur situé dans un puits de forage. Le signal à bande étroite est modifié par passage à travers la formation, et la formation réfléchit au moins une partie du signal à bande étroite vers le puits de forage, ce qui donne un signal modifié à bande étroite présentant une première fréquence. Le procédé peut aussi comprendre la détection du signal modifié à bande étroite avec un guide d'onde optique positionné dans le puits de forage, la transmission d'un signal source le long d'une longueur du guide d'onde optique et l'obtention d'un signal de retour rétrodiffusé à partir du guide d'ondes optiques. Le signal de retour rétrodiffusé est échantillonné à une deuxième fréquence qui est inférieure à deux fois le débit Nyquist du signal modifié à bande étroite. Le procédé comprend en outre le traitement du signal de retour rétrodiffusé pour obtenir une amplitude du signal à bande étroite modifiée.



DÉTECTION DE DÉFORMATION DANS DES CABLES À FIBRES OPTIQUES INDUITE PAR DES SIGNAUX À BANDE ÉTROITE

CONTEXTE

5 **[0001]** Dans l'industrie du pétrole et du gaz, il peut être nécessaire de mesurer les caractéristiques et/ou les compositions de substances situées en des lieux souterrains éloignés et de conduire les résultats à la surface pour leur traitement. Il peut par exemple être nécessaire de mesurer les propriétés chimiques et/ou physiques de substances situées dans des formations souterraines contenant des hydrocarbures et de transférer les résultats de la mesure sur une longue distance jusqu'à
 10 la surface de la terre. Ces propriétés de la formation peuvent varier continuellement, et il est souvent souhaitable de mesurer ces propriétés fréquemment pour capter les variations.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

15 **[0002]** Les figures suivantes sont présentées pour illustrer certains aspects de la présente divulgation, et ne doivent pas être considérées comme des modes de réalisation exclusifs. L'objet de l'invention divulgué peut être soumis à des modifications, des altérations, des combinaisons et des équivalents considérables dans la forme et dans la fonction, sans s'écartez de la portée de cette description.

20 **[0003]** La figure 1A illustre un exemple de système de surveillance et de mesure de puits qui peut utiliser les principes de la présente description.

[0004] Les figures 1B à 1E illustrent chacune un exemple de la mise en œuvre des capteurs de la figure 1A.

[0005] La figure 2 est un schéma fonctionnel d'un exemple de technique d'interrogation hétérodyne.

25 **[0006]** La figure 3 est un schéma fonctionnel d'un exemple de technique d'interrogation homodyne.

[0007] La figure 4 illustre un exemple de graphe de la fonction de Bessel d'ordre zéro d'un signal incident sur le guide d'ondes optiques de la figure 1A en fonction de l'amplitude du signal.

30 **[0008]** La figure 5 est un organigramme d'un exemple de procédé de calcul d'une amplitude du signal incident sur le guide d'ondes optiques de la figure 1A.

[0009] La figure 6 illustre un exemple de système de traitement qui peut mettre en œuvre un ou plusieurs modes de réalisation de la description.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE

35 **[0010]** La présente description concerne des systèmes et des procédés de calcul d'un gain d'un signal à bande étroite indépendamment de la fréquence du signal à bande étroite.

[0011] Les modes de réalisation décrits ici peuvent permettre de découpler la fréquence à laquelle une propriété ou une caractéristique d'un composant ou d'une substance dans le puits de forage est mesurée et la fréquence à laquelle la propriété ou la caractéristique mesurée est récupérée (*par ex.*, transmise en haut) pour analyse. Ainsi, il peut être possible de mesurer les propriétés ou les 5 caractéristiques de substances en bas d'un puits grâce à des instruments à haute fréquence (*par ex.*, des instruments de mesure ultrasonore) et d'utiliser des instruments à basse fréquence pour transmettre les propriétés ou caractéristiques mesurées vers le haut pour une analyse supplémentaire. Les principes de la présente description peuvent être utilisés dans un certain nombre d'applications impliquant la détection acoustique, par exemple la détection de débit et l'estimation d'un régime d'écoulement, et 10 des applications impliquant la détection électromagnétique (EM), par exemple la détection de durcissement de ciment, le micrométrage acoustique, l'identification de fluide et les mesures d'impédance de fond de puits. Par exemple, les modes de réalisation décrits ici peuvent permettre à ces applications de mesurer des caractéristiques de puits de forage grâce à des instruments à haute fréquence, tandis que les données mesurées peuvent être récupérées pour traitement grâce aux 15 instruments existants à basse fréquence. Les spécialistes apprécieront facilement que les modes de réalisation décrits ici proposent des procédés améliorés de réalisation d'un examen à haute fréquence d'un puits de forage sans investissement dans de nouveaux outils, dans des accessoires pour outil ou dans des adaptations d'outils existants.

[0012] Si l'on se réfère à la figure 1A, on trouve l'illustration d'un exemple de système 20 100 de surveillance et de mesure de puits qui peut utiliser les principes de la présente description. On peut noter que le système 100 de surveillance et de mesure de puits peut être utilisé dans une opération terrestre ainsi que dans toute application marine ou sous-marine comprenant une plateforme flottante ou une installation de tête de puits immergée, comme on le sait généralement dans la technique. Comme l'illustre la figure 1A, au moins un émetteur 102 (dont deux sont illustrés) peuvent 25 se trouver au fond dans un puits de forage 106 foré dans une formation souterraine 104. Par exemple, les émetteurs 102 peuvent se trouver dans un anneau 108 formé entre le puits de forage 106 et un boîtier 110 qui y est fixé par du ciment 113.

[0013] Les émetteurs 102 peuvent être raccordés ensemble et à une interface 112 située à 30 la surface de la terre 103 par un câble de commande 114. Les émetteurs 102 peuvent être connectés en série, en parallèle ou selon une combinaison de ceux-ci. Le câble de commande 114 peut prendre différentes formes (*par ex.*, un câble de tuyauterie encapsulé) et peut contenir des conducteurs électriques logés et/ou des guides d'onde optiques (*e.g.*, des fibres) qui transmettent la puissance électrique et les instructions de commande aux émetteurs 102. L'interface 112 peut contenir un contrôleur 116 pour diriger les opérations des émetteurs 102.

[0014] En fonction du ou des signaux de commande issus de l'interface 112, les émetteurs 102 peuvent produire chacun, soit simultanément, soit à différents moments, un signal 120 à bande étroite à haute fréquence (*e.g.*, plus de 100 kHz), dont les caractéristiques, telles que

l'amplitude, la fréquence et/ou la phase, sont sous le contrôle de l'utilisateur par le biais de l'interface 112. Dans un mode de réalisation, le signal 120 peut être un signal électromagnétique (EM) et il peut être produit par les émetteurs 102 qui contiennent des bobines extérieures au boîtier 110, comme le montre la figure 1A. Dans un autre mode de réalisation, le signal 120 peut être un signal acoustique et l'émetteur 102 peut être tout générateur de signaux acoustiques connu dans la technique. Les émetteurs 102 peuvent se trouver au fond dans un autre puits de forage, à la surface de la terre, ou dans un autre emplacement. La portée de cette description n'est pas limitée à une position particulière d'un émetteur, à n'importe quel type d'émetteur ou à toute technique particulière servant à produire et à transmettre le signal 120 dans la formation 104.

[0015] La formation 108 et/ou le ciment 113 peuvent modifier les caractéristiques du signal 120 (EM ou acoustique). Le signal modifié est détecté par les capteurs 121 couplés à un guide d'ondes optiques 122 (tel qu'une fibre optique ou un ruban optique) situé dans l'anneau 108. Dans certains modes de réalisation, le guide d'ondes optiques 122 peut être attaché à l'extérieur du boîtier 110. Dans d'autres modes de réalisation, le guide d'ondes optiques 122 comprenant les capteurs 121 peut être déployé dans le boîtier 110 grâce à un câble. Dans d'autres modes de réalisation, cependant, le guide d'ondes optiques 122 peut être placé à une frontière du ciment 113 (*e.g.*, à côté de la paroi du puits de forage 106). Dans ces modes de réalisation, les émetteurs 120 peuvent se trouver à une limite opposée du ciment 113 et le signal 120 peut donc traverser le ciment 113 avant d'être détecté par les capteurs 121 du guide d'ondes optiques 122.

[0016] Dans un exemple, la fréquence du signal 120 émis depuis l'émetteur 102 peut varier et un signal modifié comprenant un spectre de fréquence est obtenu depuis la formation. Des exemples illustratifs d'une substance ou d'une propriété intéressante qui peuvent être détectées par les capteurs 121 peuvent comprendre, *par ex.*, la composition chimique (*par ex.*, l'identité et la concentration totale ou des composants individuels), la présence en phase (*par ex.*, gaz, pétrole, eau, etc.), le contenu en impuretés, le pH, l'alcalinité, la viscosité, la densité, la force ionique, les solides totaux dissous, la teneur en sel (*par ex.*, la salinité), la porosité, l'opacité, la teneur en bactéries, la dureté totale, des combinaisons de ceux-ci, l'état de la matière (solide, liquide, gaz, émulsion, des mélanges de ceux-ci, etc.), etc.

[0017] Les figures 1B à 1E illustrent chacune un exemple de configuration de capteur 121, où un guide d'onde optique 122 est lié ou autrement attaché à un matériau 126 qui change de forme en réponse à l'exposition au signal EM 120 reçu depuis la formation 104. Comme l'illustrent les figures 1B à 1D, le matériau 126 est lié à une partie du guide d'ondes optiques 122 longitudinalement entre deux réseaux de Bragg 124 en fibre. Par exemple, on peut utiliser un époxy pour faire adhérer le guide d'ondes optiques 122 au matériau 126. À la figure 1B, le matériau 126 est illustré sous la forme d'un câble ou d'une tige. À la figure 1C, le guide d'ondes optiques 122 est chemisé ou revêtu (entouré) par le matériau 126. Le matériau 126 est lié ou autrement attaché par adhérence à une surface extérieure du guide d'ondes optiques 122. À la figure 1D, le matériau 126 est

illustré sous forme plane. À la figure 1E, le guide d'ondes optiques 122 est enroulé autour du matériau 126 qui est sous forme cylindrique. Dans ce cas, un agrandissement radial ou une contraction du matériau cylindrique 126 doit modifier la déformation dans le guide d'ondes optiques 122. Le guide d'ondes optiques 122 peut ou non être lié au matériau 126.

5 **[0018]** Le matériau 126 peut contenir un matériau magnétorestrictif (tel que Co, Fe, Ni et des alliages à base de fer METGLAST™ et TERFENOL-D™) ou un matériau electrostrictif (tel que du niobate de magnésium au plomb (PMN), du niobate de magnésium plomb-titanate de plomb (PMN-PT), du titanate zirconate de plomb (PZT) et du titanate zirconate de plomb lanthane (PLZT)).

10 **[0019]** Quand le matériau 126 change de forme, la longueur du guide d'ondes optiques 122 attachée au matériau 126 est allongée ou contractée entre les deux réseaux de Bragg 124. Ainsi, une variation de déformation (ou une variation de longueur par unité de longueur) est induite dans le guide d'ondes optiques 122 entre les réseaux de Bragg 124 sous l'effet du signal électromagnétique 120. On peut mesurer la déformation selon une variété de techniques d'interférométrie.

15 **[0020]** En bref, aux emplacements des capteurs 121, un faisceau de lumière hautement cohérente (telle qu'une impulsion laser) transmise à partir d'un emplacement de surface dans le guide d'ondes optiques 122 est modulé par une variation de forme du matériau 126 du fait du champ électromagnétique du signal EM 120. Le signal modulé issu de chaque capteur 121 parcourt le guide d'ondes optiques 122 jusqu'à un interrogateur de signaux (118) où un signal de chaque capteur 121 est extrait et démodulé et où la force du champ électromagnétique à chaque emplacement du capteur est 20 ainsi déterminée. Ainsi, la propriété électromagnétique de la formation 104 peut être cartographiée le long du guide d'ondes optiques 122.

25 **[0021]** Le réseau de Bragg 124 peut s'avérer utile pour extraire un signal modulé de chaque capteur 121. Dans un procédé de multiplexage à division de longueur d'onde par exemple, on peut utiliser le réseau de Bragg 124 pour réfléchir sélectivement les longueurs d'onde du faisceau de lumière hautement cohérente pour qu'on puisse distinguer des autres le signal d'un capteur au niveau de l'interrogateur 118. Le faisceau incident de lumière est partiellement réfléchi au niveau d'un premier réseau de Bragg 124. Le reste de la lumière voyage à travers une cavité entre les réseaux de Bragg 124 et elle est encore en partie réfléchie au niveau du deuxième réseau.

30 **[0022]** La lumière réfléchie des réseaux de Bragg 124 est recouplée dans la même fibre optique et guidée vers un dispositif de surveillance/interrogateur optique 118 (figure 1A). Il y aura une variation de phase entre la lumière réfléchie à partir du premier réseau de Bragg 124 et la lumière réfléchie à partir du deuxième réseau de Bragg, du fait d'une déformation induite dans le guide d'ondes optiques 122 liée au matériau 126 entre les réseaux de Bragg 124.

35 **[0023]** Dans l'exemple d'application, le système 100 de surveillance et de mesure de puits peut être utilisé pour la surveillance d'inondations. Ici, on peut faire une mesure d'intervalle de temps, au cours duquel des champs électriques ou magnétiques (du signal EM 120) sont mesurés en

fonction du temps au niveau de chaque capteur 121. Dans un système de mesure d'intervalle de temps, on effectue une première mesure à un moment où il n'y a pas d'inondation et une deuxième mesure a lieu à un moment en cas d'inondation, ce qui produit un signal différentiel. Alors que l'inondation s'approche d'un capteur 121, le signal différentiel devient plus grand. L'intensité du signal différentiel indique une distance jusqu'au front d'inondation. La variation de champ électrique (ou magnétique) induit une variation de forme du matériau 126, qui doit alors induire une variation de déformation dans le guide d'ondes optiques 122. On peut mesurer la variation de déformation selon des techniques d'interférométrie connues dans la technique.

[0024] Dans le cas où un signal acoustique 120 est émis par l'émetteur 102, les capteurs 121 peuvent être absents. L'interaction du guide d'onde optique 122 avec le signal acoustique modifié 120 reçu depuis la formation 104 ou le ciment 113 produit une déformation dans le guide d'onde optique 122, qui est traduite en une variation dans la phase de la lumière rétrodiffusée. On peut employer une détection acoustique distribuée (DAS) pour mesurer la variation de la déformation dans le guide d'ondes optiques 122 sous l'effet du signal électromagnétique 120. En bref, en cas de DAS, un dispositif de surveillance optique/interrogateur 118 situé à l'interface 112 peut injecter un faisceau de lumière hautement cohérente, telle qu'une impulsion laser, dans le guide d'ondes optiques 122. La variation de déformation du guide d'onde optique 122 due au signal acoustique 120 entraîne une variation de longueur de chemin et/ou une variation de l'indice de réfraction du guide d'onde optique 122, ce qui entraîne une variation de phase optique dans le signal de retour rétrodiffusé. La variation de phase est détectée et analysée par le dispositif de surveillance optique/interrogateur 118 pour déterminer l'emplacement du composant ou de la substance dans le puits de forage 106.

[0025] La DAS est abordée ici comme un exemple de technique de modulation de phase interférométrique utilisée pour mesurer la variation de déformation dans le guide d'ondes optiques 122. Les modes de réalisation décrits ici ne s'y limitent pas toutefois. On peut aussi utiliser d'autres techniques d'interférométrie où les informations utiles sont transmises dans la phase et au débit auquel la lumière rétrodiffusée qui est échantillonnée (ou en d'autres mots, le débit où la variation de déformation est interrogé) est inférieur au débit de Nyquist (qui est le double de la fréquence du signal à bande étroite 120 reçu au niveau du guide d'onde optique 122). Dans le cas de DAS, le débit où la lumière rétrodiffusée est échantillonnée avoisine 10 kHz, tandis que la fréquence du signal à bande étroite 120 est supérieur à 100 kHz (le débit de fréquence Nyquist étant supérieur à 200 kHz).

[0026] On peut mesurer la variation de phase dans le signal de retour rétrodiffusé du fait d'une variation de déformation causée par le signal acoustique haute fréquence à bande étroite 120 reçu depuis la formation 104 ou le ciment 113 selon un certain nombre de procédés de détection, dont deux sont décrits ici ci-après en tant que procédé de détection d'hétérodyne et procédé de détection d'homodyne.

[0027] Si l'on se réfère à la figure 2, on trouve un exemple de schéma d'interrogation 200 d'hétérodyne qu'on peut appliquer au système 100 à la figure 1A et qui est illustré de manière

représentative. Le schéma d'interrogation d'hétérodyne 200 peut être mis en œuvre dans le dispositif de surveillance optique/interrogateur 118. Dans le schéma d'interrogation 200 d'hétérodyne, chaque capteur 121 (figures 1B-1E) comprend une paire de réflecteurs ponctuels (*par ex.*, des réseaux de Bragg, etc.), avec le guide d'ondes optique 122 entre les réflecteurs. Le guide d'ondes optiques 122 situé entre les réflecteurs subit une déformation en fonction du paramètre en cours de mesure. Les variations de déformation dans le guide d'onde optique 122 entre les réflecteurs ponctuels adjacents induisent une différence de chemin optique transmis dans le guide d'ondes optiques 122 à partir d'un emplacement de surface. La différence de chemin optique induit une variation de phase dans la lumière rétrodiffusée. Dans un mode de réalisation, les capteurs 121 peuvent être absents et le guide d'ondes optiques 122 situé entre une paire de réflecteurs « virtuels » subit une déformation en fonction de la distance entre une paire de réflecteurs « virtuels » correspondant à la moitié de la longueur de la bobine de retard. Les réflecteurs « virtuels » ne sont pas des réflecteurs physiques, mais sont des points prédefinis le long du guide d'onde optique 122 et un emplacement de ce dernier est déterminé par le temps de vol de la lumière rétrodiffusée. Si par exemple l'on souhaite une séparation d'un mètre entre des réflecteurs « virtuels » adjacents, la lumière rétrodiffusée est échantillonnée à des instants correspondant au temps nécessaire pour que l'impulsion émise avance de deux mètres (distance aller-retour). Les variations de déformation dans le guide d'onde optique 122 entre les réflecteurs « virtuels » adjacents induisent une différence de chemin optique transmis dans le guide d'ondes optiques 122 à partir d'un emplacement de surface. La différence de chemin optique induit une variation de phase dans la lumière rétrodiffusée. On notera que par souci pédagogique, on peut utiliser les termes rétrodiffusé et rétroréfléchi de manière équivalente et qu'ils désignent la lumière réfléchie vers le dispositif de surveillance/interrogateur 118 soit du fait de la présence des réflecteurs « virtuels », soit des réflecteurs ponctuels.

[0028] Le guide d'ondes optiques 122 est interrogé par deux impulsions f1, f2 qui sont espacées à deux fois la distance entre les deux réflecteurs, de sorte que la réflexion des deux impulsions f1, f2 doit revenir au dispositif de surveillance/interrogateur 118 au même instant.

[0029] Dans cet exemple, pour déterminer la mesure de phase, les impulsions f1, f2 doivent être modifiées en fréquence les unes par rapport aux autres d'une fréquence connue comme la fréquence intermédiaire (IF). La fréquence intermédiaire doit être extraite au niveau du dispositif de surveillance optique/interrogateur 118 à partir d'un mélange à loi quadratique des deux impulsions réfléchies f1, f2 qui se chevauchent.

[0030] On procède à la mesure de phase grâce à l'IF ou à la fréquence de battement. Le signal à IF est abaissé jusqu'à une bande de base par une paire de mélangeurs 222, 224 qui mélangeant le signal à partir du récepteur optique 220 avec une sinusoïde produite par un oscillateur IF 212 à la même IF.

[0031] Un mélangeur 222 reçoit le signal d'oscillateur IF 212 directement et le deuxième mélangeur 224 reçoit une version décalée de 90° du signal d'oscillateur. Ce faisant, la sortie d'un

mélangeur 222 contient la mesure en phase (I) de la phase, et le deuxième mélangeur 224 contient la mesure de quadrature (Q) de la phase.

[0032] Ces signaux I et Q sont échantillonnés simultanément par deux convertisseurs analogique à numérique (non représentés). On peut calculer la phase à partir de la tangente inverse de Q/I. Les opérations de mélange peuvent aussi se faire numériquement si le signal est échantillonné à un débit suffisamment élevé.

[0033] Pour produire les deux impulsions f1 et f2, un générateur d'impulsions 204 reçoit de la lumière à partir d'une source 202 d'onde continue (CW) et émet une impulsion qui est divisée en deux voies, avec une voie comportant une bobine de retard 208 pour obtenir une séparation d'impulsion. De plus, une des voies contient un dispositif de changement de fréquence 210 (par exemple, un modulateur acoustico-optique) qui modifie la fréquence lumineuse par la fréquence intermédiaire. Le générateur d'impulsions 204 est couplé à la bobine de retard 208 et au dispositif de variation de fréquence 210 par l'intermédiaire d'un coupleur 206. Les sorties de la bobine de retard 208 et du dispositif de variation de fréquence 210 sont dotées d'un autre coupleur 214 qui est connecté à un circulateur 216 qui reçoit les impulsions de retour rétrodiffusées à partir d'au moins un capteur 121.

[0034] Si l'on se réfère à la figure 3, on trouve l'illustration représentative d'un exemple de schéma d'interrogation 300 d'homodyne qu'on peut appliquer au système 100. Le schéma d'interrogation d'homodyne 300 peut être mis en œuvre dans le dispositif de surveillance optique/interrogateur 118. Dans le schéma d'interrogation d'homodyne 300, une seule impulsion d'interrogation optique est envoyée le long du guide d'ondes optiques 122.

[0035] Un générateur d'impulsions 204 reçoit de la lumière à partir d'une source d'onde continue (CW) 202 et émet une impulsion d'interrogation à un circulateur 216. Le circulateur 216 transmet l'impulsion d'interrogation au guide d'ondes optiques 122. Comme on l'a déjà indiqué, chaque capteur 121 du guide d'ondes optiques 122 comprend une paire de réflecteurs ponctuels (ou de réflecteurs « virtuels », le cas échéant) avec le guide d'ondes optique 122 entre les réflecteurs. Le guide d'ondes optiques 122 subit une déformation en fonction du paramètre en cours de mesure.

[0036] Quand l'impulsion d'interrogation traverse le guide d'onde optique 122, les imperfections du guide d'ondes optiques 122 peuvent amener une partie de l'impulsion d'interrogation à être rétrodiffusée le long du guide d'ondes optiques 122. L'impulsion d'interrogation de retour rétrodiffusée peut revenir à travers le guide d'ondes optiques 122 jusqu'à ce qu'elle atteigne le circulateur 216 qui retransmet l'impulsion d'interrogation de retour rétrodiffusée à un coupleur 1x2 302. Le coupleur 1x2 302 divise l'impulsion d'interrogation de retour rétrodiffusé de sorte que la moitié de l'impulsion d'interrogation de retour rétrodiffusée traverse la voie du fond et que la moitié de l'impulsion d'interrogation de retour rétrodiffusée traverse la voie supérieure.

[0037] La bobine de retard 208 de longueur égale à deux fois la distance entre les deux réflecteurs retarde l'impulsion à partir de la voie supérieure de sorte que, tandis que les deux impulsions se recombinent au niveau d'un coupleur 3x3 304, elles correspondant à deux positions distinctes le long de la fibre constituant une paire de réflecteurs ponctuels (ou de réflecteurs « virtuels », le cas échéant). Les impulsions chevauchantes quittent le coupleur 3x3 304 sur les trois pattes du coupleur 304. Les phases des impulsions dans les trois pattes les unes par rapport aux autres sont modifiées différemment pour chaque patte du coupleur 304 en fonction de la théorie de mode couplé. Ainsi, le coupleur 3x3 304 doit produire trois signaux interférométriques. Par exemple, la première patte doit contenir les signaux combinés depuis les réflecteurs. La deuxième patte doit contenir les signaux combinés déphasés de $+120^\circ$. La troisième patte doit contenir les signaux combinés déphasés de -120° .

[0038] Les trois pattes du coupleur 304 reçoivent efficacement des retards de phase (en plus du retard de phase réel entre la lumière réfléchie depuis chacun des réflecteurs du capteur 121) de 0, $+120$ et -120 degrés. Ces trois signaux interférométriques donnent suffisamment de diversité de phase pour calculer la différence de phase entre la lumière réfléchie depuis chacun des réflecteurs du capteur 121 de la manière suivante :

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{3} * A - B \\ Q &= A + B - 2C \\ \text{PHASE} &= \text{ARCTAN}\left(\frac{Q}{I}\right) \end{aligned}$$

où A, B et C sont les signaux reçus des trois pattes du coupleur 304, respectivement. Dans un autre mode de réalisation, on peut employer un hybride optique à 90° qui émet directement les signaux I/Q au lieu du coupleur 3x3 304.

[0039] Par souci de simplicité, le processus mentionné ci-après a été décrit en lien avec un émetteur simple 102 ; toutefois, on comprendra que le processus peut également s'appliquer à tous les émetteurs 102. On notera aussi que le processus mentionné ci-après prend en considération l'amplitude (ou l'énergie) du signal modifié 120 (cf. figure 1A) détecté par le guide d'onde optique 122 (cf. 1A). Le signal modifié 120 incident sur le guide d'onde optique 122 peut être globalement représenté sous la forme :

$$x(t) = A_E \cos(\omega_E t + \Phi_E)$$

où A_E , Φ_E et ω_E représentent l'amplitude, la phase et la fréquence du signal $x(t)$, respectivement. Par souci pédagogique, on considère que le signal 120 émis depuis l'émetteur 102 interagit avec la formation 104 et/ou avec le ciment 113, et que l'amplitude du signal 120 est modifiée selon l'interaction, alors que l'on considère que la fréquence ω_E et la phase Φ_E restent inchangées. En conséquence, l'amplitude du signal 120 émis depuis l'émetteur 102 diffère de

l'amplitude A_E , tandis que la fréquence ω_E et la phase Φ_E , du signal émis depuis l'émetteur 102 restent inchangées. Le signal $x(t)$ peut contenir des variations de déformation dans le guide d'onde optique 122. Comme on l'a déjà indiqué, une lumière hautement cohérente (*par ex.* une impulsion laser) peut être injectée 5 dans le guide d'ondes optiques 122 et peut être soit rétroréfléchie du fait des points discrets (*par ex.* un réseau de Bragg à fibre) placé le long de la fibre, soit rétrodiffusée en continu du fait de la rétrodiffusion de Rayleigh. La variation de déformation causée par le signal $x(t)$ (ou par le matériau 126 (figures 1B à 1E) attachée au guide d'onde optique 122) peut provoquer une variation de 10 phase dans le signal rétrodiffusé (ou rétroréfléchi). Le signal de retour rétrodiffusé peut être détecté par le dispositif de surveillance optique/interrogateur 118. Par souci de pédagogie, nous considérons une détection homodyne du signal de retour rétrodiffusé, même si l'explication qui suit s'applique aussi à la détection hétérodyne du signal de retour rétrodiffusé. 15 Le signal de retour rétrodiffusé peut être représenté sous la forme suivante :

$$y(t) = Q(t) + j I(t) = A_O e^{j[x(t)]} = A_O e^{j[(A_E \cos[\omega_E t + \Phi_E])]}$$

où A_O représente le gain optique complexe du signal $y(t)$.

[0040] Le signal $y(t)$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$y(t) = A_O \sum_n J_n(A_E) e^{j[(n\omega_E t + \Phi_E)]}$$

20 où J_n représente la fonction de Bessel de n^{e} ordre du signal $x(t)$. D'après l'équation qui précède, on peut noter que le spectre du signal détecté $y(t)$ peut se composer de lignes sur ω_E et ses multiples, dont les amplitudes peuvent être déterminées par la fonction de Bessel d'un ordre approprié d'amplitude A_E . Le signal $y(t)$ peut être filtré grâce à un filtre passe-bas présentant une fréquence de coupure à ω_E ou aux environs de cette valeur, et l'on peut obtenir le signal suivant :

$$y_{DC}(t) = A_O J_0(A_E)$$

25 qui représente un nombre dans le plan complexe (ou le plan des z), à supposer que le gain optique A_O soit constant.

[0041] Pour bien estimer l'amplitude A_E , il peut falloir estimer le gain optique complexe A_O . Dans un mode de réalisation, le dispositif de surveillance/interrogateur optique 118 peut émettre 30 une commande au contrôleur 116 pour arrêter l'émetteur 102. Le dispositif de surveillance/interrogateur optique 118 peut mesurer l'amplitude du signal y_{DC} tandis que l'émetteur 102 est à l'arrêt. Le dispositif de surveillance optique/interrogateur 118 peut émettre une autre commande vers le contrôleur 116 pour mettre en marche l'émetteur 102, et peut mesurer l'amplitude

du signal y_{DC} pendant que l'émetteur 102 est en MARCHE. Le dispositif de surveillance optique/interrogateur 118 peut alors calculer une différence parmi les amplitudes pour obtenir une estimation du gain optique complexe A_O .

[0042] La figure 4 illustre un exemple de graphe de la fonction de Bessel d'ordre zéro $J_0(A_E)$ en fonction de l'amplitude de signal A_E , où l'on peut voir que J_0 n'est pas une fonction monotone. Si l'on se réfère à la figure 4, on voit qu'il peut être possible de mesurer l'amplitude A_E de manière univoque si l'amplitude A_E est inférieure à une certaine valeur. Comme le fonctionnement de l'émetteur 102 peut être contrôlé, il peut être possible de réguler l'émetteur 102 (*par ex.*, par réduction de sa puissance de transmission) pour que l'amplitude reçue A_E du signal $x(t)$ soit réduite. Par exemple, d'après le graphe, pour la valeur de « 0 » $J_0(A_E)$ de la fonction de Bessel d'ordre zéro, l'amplitude de signal A_E peut valoir 2,3, 5,5 et 8,3, approximativement. Pour obtenir une valeur bien définie de l'amplitude A_E du signal reçu $x(t)$, l'émetteur 102 peut être contrôlé pour que l'amplitude A_E puisse être réduite à moins de « 2 ». Ainsi, on peut voir que des valeurs bien définies de la fonction de Bessel d'ordre zéro $J_0(A_E)$ peuvent être obtenues pour une valeur d'amplitude A_E intérieure à « 2 » environ.

[0043] Comme on peut le constater, l'équation pour $y_{DC}(t)$ ci-dessus ne contient pas de terme représentant la fréquence ω_E du signal $x(t)$ incident sur le guide d'onde optique 122. On peut ainsi déterminer que l'amplitude A_E peut s'obtenir indépendamment de la fréquence ω_E du signal incident $x(t)$. En conséquence, il peut être possible de mesurer une propriété d'une substance dans le puits de forage par un outil de haute fréquence (*par ex.* supérieure à 100 kHz) et d'échantillonner la propriété mesurée à une fréquence moindre (*par ex.* inférieure à 10 kHz).

[0044] La figure 5 est un organigramme d'un exemple de procédé 500 de calcul d'une amplitude du signal incident sur le guide d'ondes optiques de la figure 1A. Le procédé 500 peut comprendre la transmission d'un signal à bande étroite dans une formation, grâce à un émetteur situé dans un puits de forage, comme en 502. Le signal à bande étroite est modifié par passage à travers la formation, et la formation réfléchit au moins une partie du signal à bande étroite vers le puits de forage, ce qui donne un signal modifié à bande étroite présentant une première fréquence. Le procédé 500 peut aussi comprendre la détection du signal modifié à bande étroite avec un guide d'onde optique positionné dans le puits de forage, comme en 504, et la transmission d'un signal source le long d'une longueur du guide d'onde optique et l'obtention d'un signal de retour rétrodiffusé à partir du guide d'ondes optiques, comme en 506. Le signal de retour rétrodiffusé est échantillonné à une deuxième fréquence qui est inférieure à deux fois le débit Nyquist du signal modifié à bande étroite. Le procédé 500 peut en outre comprendre le traitement du signal de retour rétrodiffusé pour obtenir une amplitude du signal à bande étroite modifié avec la guide d'ondes optiques, comme en 508.

[0045] La figure 6 illustre un exemple de système de traitement 600 permettant de mettre en œuvre un ou plusieurs modes de réalisation de la description. Le système 600 peut comprendre un processeur 610, une mémoire 620, un dispositif de stockage 630 et un dispositif entrée/sortie 640. Chacun des composants 610, 620, 630 et 640 peut être interconnecté, par exemple avec un bus de système 650. Le processeur 610 peut traiter des instructions destinées à être exécutées à l'intérieur du système 600. Dans certains modes de réalisation, le processeur 610 est un processeur à une seule file, un processeur à files multiples ou un autre type de processeur. Le processeur 610 peut traiter des informations stockées dans la mémoire 620 ou sur le dispositif de stockage 630. La mémoire 620 et le dispositif de stockage 630 peuvent stocker des informations à l'intérieur du système informatique 600.

[0046] Le dispositif d'entrée/de sortie 640 procure des opérations d'entrée/sortie pour le système 600. Dans certains modes de réalisation, le dispositif d'entrée/sortie 640 peut comprendre un ou plusieurs dispositifs d'interfaces de réseau, *par ex.* une carte Ethernet ; un dispositif de communication en série, *par ex.* un port RS-232 ; et/ou un dispositif d'interfaces sans fil, *par ex.*, une carte 802.11, un modem sans fil 3G ou un modem sans fil 4G. Dans certains modes de réalisation, le dispositif d'entrée/sortie peut comporter des dispositifs pilotes configurés pour recevoir des données d'entrée et pour envoyer des données de sortie vers d'autres dispositifs d'entrée/de sortie, *par ex.*, un clavier, une imprimante et des dispositifs d'affichage 660. Dans certains modes de réalisation, des dispositifs informatiques mobiles, des dispositifs de communication mobiles et d'autres dispositifs peuvent être utilisés.

[0047] En conformité avec au moins certains modes de réalisation, les procédés et les systèmes décrits apparentés à du matériel de balayage et d'analyse peuvent être implémentés dans un circuit électronique numérique, ou dans un logiciel informatique, un micrologiciel ou un matériel, comprenant les structures décrites dans cette description et de leurs équivalents structuraux, ou dans des combinaisons d'un ou de plusieurs de ceux-ci. Les logiciels informatiques peuvent comprendre, par exemple, un ou plusieurs modules d'instructions, codés sur un support d'enregistrement lisible par ordinateur pour être exécutés par, ou pour commander le fonctionnement d'un dispositif de traitement de données. Des exemples de dispositif d'enregistrement lisible par un ordinateur comprennent des dispositifs de mémoire vive (RAM), des dispositifs de mémoire morte (ROM), des dispositifs optiques (*par ex.*, CD ou DVD), et des lecteurs de disques.

[0048] Le terme « dispositif de traitement de données » englobe tous les types d'appareils, de dispositifs et de machines pour le traitement des données, comprenant, comme exemple, un processeur programmable, un ordinateur, un système sur une puce, ou de multiples, ou des combinaisons de ceux-ci. Le dispositif peut comprendre un circuit de logique spécialisé, *par ex.*, un FPGA (circuit intégré prédiffusé programmable) ou un ASIC (circuit intégré à application spécifique). L'appareil peut également comprendre, en sus du matériel, un code qui crée un environnement d'exécution pour le programme informatique en question, *par ex.*, un code qui constitue le micrologiciel du processeur, une pile de protocoles, un système de gestion de bases de

données, un système de gestion de bases de données, un système d'exploitation des données, un environnement de durée d'exécution multiplateformes, une machine virtuelle ou une combinaison de l'un ou plusieurs de ceux-ci. L'appareil et l'environnement d'exécution peuvent réaliser différentes infrastructures de modèles informatiques, telles que des services Web et des infrastructures informatiques distribuées et en grille.

[0049] Un programme informatique (aussi appelé, programme, logiciel, application logicielle, script ou code) peut être écrit dans une quelconque forme de langage de programmation, y compris des langages compilés ou interprétés, déclaratifs ou langues procédurales. Un programme informatique peut, mais pas nécessairement, correspondre à un fichier d'un système de fichiers. Un programme peut être stocké dans une partie d'un fichier qui contient d'autres programmes ou données (*par ex.*, un ou plusieurs scripts stockés dans un document de langage de marquage), dans un fichier unique dédié au programme en question ou dans plusieurs fichiers coordonnés (*par ex.*, les fichiers qui contiennent un ou plusieurs modules, des sous programmes ou des portions de code). Un programme informatique peut être exécuté sur un ordinateur ou de multiples ordinateurs qui sont localisés sur un site ou sur de multiples sites dispersés et connectés entre eux par un réseau de télécommunication.

[0050] Certains des processus et des flux logiques décrits dans cette spécification peuvent être réalisés par un ou plusieurs processeurs programmables exécutant un ou plusieurs programmes informatiques pour générer des actions en traitant des données d'entrée et en générant une sortie. Les processus et les flux logiques peuvent également être réalisées par, et le dispositif peut être également implémenté sous forme de circuits logiques à fonction spéciale, *par ex.*, un FPGA (circuit intégré prédiffusé programmable) ou un ASIC (circuit intégré à application spécifique).

[0051] Les processeurs appropriés pour l'exécution d'un programme informatique comprennent, comme exemple, à la fois des microprocesseurs et des processeurs polyvalents et spécialisés d'un type quelconque d'ordinateur numérique. En général, un processeur recevra des instructions et des données à partir d'une mémoire morte ou d'une mémoire vive, ou des deux. Un ordinateur comprend un processeur permettant d'exécuter des actions en conformité avec les instructions et un ou plusieurs dispositifs de mémoire pour stocker les instructions et les données. Un ordinateur peut également comprendre, ou peut être couplé de façon fonctionnelle pour recevoir des données d'un ou de plusieurs dispositifs de stockage de masse permettant de stocker des données ou pour transférer des données vers ceux-ci, ou les deux, *par ex.*, des disques magnétiques, magnéto-optiques ou des disques optiques. Cependant, un ordinateur peut ne pas comporter ces dispositifs. Les dispositifs appropriés pour stocker des instructions et des données d'un programme informatique comprennent toutes les formes de mémoire non volatile, des supports et des dispositifs de mémoire, comprenant par exemple des dispositifs semi-conducteurs à mémoire (*par ex.*, EPROM, EEPROM, dispositifs à mémoire flash, et d'autres), des disques magnétiques (*par ex.*, des disques durs internes, des disques amovibles et autres), des disques magnéto-optiques et des disques CD-ROM et DVD-

ROM. Le processeur et la mémoire peuvent être supplémentés par, ou incorporés dans, un circuit logique dédié.

5 [0052] Afin d'assurer une interaction avec un utilisateur, les opérations peuvent être implémentées sur un ordinateur possédant un dispositif d'affichage (*par ex.*, un écran ou un autre type de dispositif d'affichage) pour afficher des informations à l'utilisateur et un clavier et un dispositif de pointage (*par ex.*, une souris, une boule de commande, une tablette, un écran tactile ou un autre type de dispositif de pointage) grâce auquel l'utilisateur peut entrer des données dans l'ordinateur. D'autres types de dispositifs peuvent également être utilisés pour assurer une interaction avec un utilisateur ; par exemple, une rétroaction provenant de l'utilisateur peut être sous forme d'une rétroaction 10 sensorielle quelconque, *par ex.*, une rétroaction visuelle, une rétroaction acoustique ou une rétroaction tactile ; et l'entrée de l'utilisateur peut être reçue sous n'importe quelle forme, y compris acoustique, vocale ou une saisie tactile. En outre, un ordinateur peut interagir avec un utilisateur en envoyant des documents vers un dispositif qui est utilisé par l'utilisateur et en recevant des documents provenant de ce dispositif ; *par ex.*, en envoyant des pages Web vers un navigateur ou un dispositif client de 15 l'utilisateur en réponse aux requêtes provenant du navigateur Web.

20 [0053] Un système informatique peut comprendre un dispositif informatique unique, ou de multiples ordinateurs qui fonctionnent à proximité ou généralement à distance les uns des autres et qui communiquent généralement à travers un réseau de télécommunication. Des exemples de réseaux de communication comprennent un réseau local (« LAN ») et un réseau étendu (« WAN »), un inter-réseau (*par ex.*, l'Internet), un réseau comprenant une liaison satellite et des réseaux poste à poste (*par ex.*, des réseaux poste à poste ad hoc). Une relation de client et de serveur peut être générée par des programmes informatiques qui sont exécutés sur les ordinateurs respectifs et qui possèdent une relation client/serveur l'un vers l'autre.

[0054] Les modes de réalisation décrits ici comprennent :

25 [0055] A. Un procédé qui comprend l'émission d'un signal à bande étroite dans une formation à l'aide d'un émetteur situé dans un puits de forage, le signal à bande étroite étant modifié par passage à travers la formation et la formation réfléchissant au moins une partie du signal à bande étroite vers le puits de forage, ce qui donne un signal modifié à bande étroite avec une première fréquence, la détection du signal à bande étroite modifié avec un guide d'ondes optiques positionné 30 dans le puits de forage, la transmission d'un signal source le long d'une longueur du guide d'ondes optiques et l'obtention d'un signal de retour rétrodiffusé à partir du guide d'ondes optiques, le signal de retour rétrodiffusé étant échantillonné à une deuxième fréquence qui est inférieure au débit de Nyquist du signal modifié à bande étroite, et le traitement du signal de retour rétrodiffusé pour obtenir une amplitude du signal modifié à bande étroite détecté avec le guide d'ondes optique.

35 [0056] B. Un système qui contient un émetteur situé dans un puits de forage et produisant un signal à bande étroite dans une formation, le signal à bande étroite étant modifié par passage à travers la formation et la formation réfléchissant au moins une partie du signal à bande

étroite vers le puits de forage, ce qui donne un signal modifié à bande étroite présentant une première fréquence, un guide d'onde optique positionné dans le puits de forage pour détecter le signal modifié à bande étroite, et une interface servant à transmettre un signal source le long d'une longueur du guide d'ondes optiques, pour obtenir un signal de retour rétrodiffusé à partir du guide d'ondes optiques, pour échantillonner le signal de retour rétrodiffusé à une deuxième fréquence inférieure au débit Nyquist du signal modifié à bande étroite et pour traiter le signal de retour rétrodiffusé pour obtenir une amplitude du signal modifié à bande étroite.

[0057] C. Un produit de type programme informatique qui contient un support lisible par ordinateur non transitoire sur lequel se trouve enregistré un code de programme informatique lisible par ordinateur qui, quand on l'exécute par un ordinateur, configure l'ordinateur pour transmettre un signal à bande étroite dans une formation à l'aide d'un émetteur situé dans un puits de forage, où le signal à bande étroite est modifié par passage à travers la formation et où la formation réfléchit au moins une partie du signal à bande étroite vers le puits de forage, ce qui donne un signal à bande étroite modifié présentant une première fréquence, le signal à bande étroite modifié étant détecté par un guide d'onde optique positionné dans le puits de forage, pour programmer une interface pour transmettre un signal source le long d'une longueur du guide d'onde optique et pour obtenir un signal de retour rétrodiffusé à partir du guide d'ondes optiques, le signal de retour rétrodiffusé étant échantillonné à une deuxième fréquence qui est inférieure au débit Nyquist du signal à bande étroite modifié, et pour programmer l'interface pour traiter le signal de retour rétrodiffusé pour obtenir une amplitude du signal à bande étroite modifié.

[0058] Chacun des modes de réalisation A, B et C peut avoir un ou plusieurs des éléments supplémentaires, selon une combinaison quelconque : Élément 1 : comprend en outre le traitement du signal de retour rétrodiffusé pour obtenir l'amplitude du signal à bande étroite modifié indépendamment de la première fréquence du signal à bande étroite modifié. Élément 2 : la détection du signal à bande étroite modifié sur le guide d'ondes optiques comprend l'induction d'une déformation dans le guide d'ondes optiques par l'intermédiaire du signal à bande étroite modifié. Élément 3 : comprend en outre le traitement du signal de retour rétrodiffusé selon des techniques de modulation de phase interférométrique. Élément 4 : le traitement du signal de retour rétrodiffusé comprenant le filtrage du signal de retour rétrodiffusé à l'aide d'un filtre passe-bas présentant une fréquence de coupure inférieure ou égale à la première fréquence. Élément 5 : comprend en outre le contrôle de l'émetteur pour faire varier l'amplitude du signal à bande étroite modifié. Élément 6 : comprend en outre la variation de fréquence du signal à bande étroite émis dans la formation et l'obtention du signal modifié à bande étroite comprenant un spectre de fréquences.

[0059] Élément 7 : l'interface traite le signal de retour rétrodiffusé pour obtenir l'amplitude du signal à bande étroite modifié indépendamment de la première fréquence du signal à bande étroite modifié. Élément 8 : l'interface traitant le signal de retour rétrodiffusé selon des techniques de modulation de phase interférométrique. Élément 9 : l'interface filtrant le signal de retour

rétrodiffusé à l'aide d'un filtre passe-bas présentant une fréquence de coupure inférieure ou égale à la première fréquence. Élément 10 : l'interface contrôlant l'émetteur pour faire varier l'amplitude du signal à bande étroite modifié. Élément 11 : l'interface faisant varier une fréquence du signal à bande étroite émis dans la formation pour obtenir le signal modifié à bande étroite comprenant un spectre de 5 fréquences.

[0060] Élément 12 : l'ordinateur étant configuré pour programmer l'interface pour traiter le signal de retour rétrodiffusé de sorte que l'amplitude du signal à bande étroite modifié s'obtient indépendamment de la première fréquence du signal à bande étroite modifié. Élément 13 : l'ordinateur est en outre configuré pour programmer l'interface pour traiter le signal de retour rétrodiffusé selon 10 des techniques de modulation de phase interférométrique. Élément 14 : l'ordinateur est en outre configuré pour programmer l'interface pour qu'elle filtre le signal de retour rétrodiffusé à l'aide d'un filtre passe-bas présentant une fréquence de coupure inférieure ou égale à la première fréquence. Élément 15 : l'ordinateur est en outre configuré pour programmer l'interface pour contrôler l'émetteur pour faire varier l'amplitude du signal à bande étroite modifié. Élément 16 : l'ordinateur est en outre 15 configuré pour faire varier une fréquence du signal à bande étroite émis dans la formation pour obtenir le signal modifié à bande étroite comprenant un spectre de fréquences.

[0061] Ainsi, les systèmes et les procédés divulgués sont bien adaptés pour parvenir aux fins et aux avantages mentionnés aussi bien que ceux qui sont inhérents à ceux-ci. Les modes de réalisation particuliers divulgués ci-dessus sont de nature illustrative seulement, et les enseignements 20 de la présente divulgation peuvent être modifiés et pratiqués de façons différentes mais équivalentes qui seront évidentes à un spécialiste du domaine qui bénéficie de ces enseignements. De plus, aucune limitation n'est prévue aux détails de construction ou de conception divulgués ici, autres que ceux décrits dans les revendications ci-dessous. Il est donc évident que les modes de réalisation illustratifs particuliers divulgués ci-dessus peuvent être altérés, combinés ou modifiés et que toutes les variations 25 de ce type sont considérées comme étant dans la portée de la présente divulgation. Les systèmes et les procédés décrits de manière illustrative ici peuvent être mis en pratique de manière appropriée en l'absence de tout élément qui n'est pas spécifiquement décrit ici et/ou de tout élément optionnel décrit ici. Bien que les compositions et les procédés soient décrits ici en termes de « comprenant », « 30 contenant » ou « incluant » divers composants ou étapes, les compositions et procédés peuvent aussi « être constitués essentiellement de » ou « être constitués de » divers composants et étapes. Tous les nombres et les intervalles indiqués ci-dessus peuvent varier d'une certaine quantité. Lorsqu'un intervalle numérique avec une limite inférieure et une limite supérieure est indiqué, tout nombre et tout intervalle compris se situant à l'intérieur de l'intervalle sont spécifiquement indiqués. En particulier, chaque intervalle de valeurs (de la forme, « d'environ a à environ b » ou, de façon 35 équivalente, « d'environ a à b », ou, de façon équivalente, « d'environ a-b ») indiqué ici doit être compris comme décrivant chaque nombre et chaque intervalle englobé à l'intérieur de l'intervalle la plus large de valeurs. Mais également, les termes dans les revendications ont une signification claire

et ordinaire sauf en cas d'indication explicite et claire définie par le demandeur. En outre, les articles indéfinis « un » ou « une », utilisés dans des revendications, tels qu'ils sont définis ici, veulent dire un ou plusieurs des éléments qu'ils introduisent. En cas de conflit dans les usages d'un mot ou d'un terme dans cette description et dans au moins un brevet ou un autre document susceptible de se trouver ici à titre de référence, les définitions qui sont en accord avec cette description doivent être adoptées.

5 [0062] Dans ce contexte, l'expression « au moins un » précédent une série d'articles, avec les termes « et » ou « ou » pour séparer l'un quelconque des articles, modifie la liste en tant que tout, plutôt que chaque membre de la liste (*c.-à-d.*, chaque terme). L'expression « au moins un » permet une signification qui comprend au moins l'un des articles, et/ou au moins une de toute combinaison des 10 articles et/ou au moins un de chacun des articles. Comme exemple, les phrases « au moins l'un de A, B et C » ou « au moins l'un de A, B ou C » décrivent seulement A, seulement B ou seulement C ; une quelconque combinaison de A, B et C et/ou au moins l'un de chacun de A, B et C.

REVENDICATIONS

Ce qui est revendiqué :

1. Procédé, comprenant :

la transmission d'un signal à bande étroite dans une formation grâce à un émetteur situé dans un puits de forage, le signal à bande étroite étant modifié par passage à travers la formation, et la formation réfléchissant au moins une partie du signal à bande étroite vers le puits de forage, ce qui donne un signal modifié à bande étroite présentant une première fréquence ;

la détection du signal à bande étroite modifié par un guide d'ondes optiques positionné dans le puits de forage ;

la transmission d'un signal source le long du guide d'ondes optiques et l'obtention d'un signal de retour rétrodiffusé à partir du guide d'ondes optiques, le signal de retour rétrodiffusé étant échantillonné à une deuxième fréquence qui est inférieure à un débit Nyquist du signal modifié à bande étroite ; et

le traitement du signal de retour rétrodiffusé pour obtenir une amplitude du signal à bande étroite modifié détecté par le guide d'ondes optiques.

2. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre le traitement du signal de retour rétrodiffusé pour obtenir l'amplitude du signal à bande étroite modifié indépendamment de la première fréquence du signal à bande étroite modifié.

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la détection du signal à bande étroite modifié sur le guide d'ondes optiques comprend l'induction d'une déformation dans le guide d'ondes optiques par l'intermédiaire du signal à bande étroite modifié.

4. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre le traitement du signal de retour rétrodiffusé selon des techniques de modulation de phase interférométrique.

5. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le traitement du signal de retour rétrodiffusé comprend le filtrage du signal de retour rétrodiffusé à l'aide d'un filtre passe-bas présentant une fréquence de coupure inférieure ou égale à la première fréquence.

6. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre le contrôle de l'émetteur pour faire varier l'amplitude du signal à bande étroite modifié.

7. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre la variation de fréquence du signal à bande étroite émis dans la formation et l'obtention du signal modifié à bande étroite comprenant un spectre de fréquences.

8. Système, comprenant :

un émetteur situé dans un puits de forage et produisant un signal à bande étroite dans une formation, le signal à bande étroite étant modifié par passage à travers la formation et la formation réfléchissant au moins une partie du signal à bande étroite dans le puits de forage, ce qui donne un signal à bande étroite modifié présentant une première fréquence ;

un guide d'ondes optiques positionné dans le puits de forage pour détecter le signal à bande étroite modifié ; et

une interface servant à transmettre un signal source le long d'une longueur du guide d'ondes optiques et à obtenir un signal de retour rétrodiffusé à partir du guide d'ondes optiques, à échantillonner le signal de retour rétrodiffusé à une deuxième fréquence qui est inférieure à un débit Nyquist du signal modifié à bande étroite, et à traiter le signal de retour rétrodiffusé pour obtenir une amplitude du signal à bande étroite modifiée.

9. Système selon la revendication 8, dans lequel l'interface traite le signal de retour rétrodiffusé pour obtenir l'amplitude du signal à bande étroite modifié indépendamment de la première fréquence du signal à bande étroite modifiée.

10. Système selon la revendication 8, dans lequel l'interface traite le signal de retour rétrodiffusé selon des techniques de modulation de phase interférométrique.

11. Système selon la revendication 8, dans lequel l'interface filtre le signal de retour rétrodiffusé à l'aide d'un filtre passe-bas présentant une fréquence de coupure inférieure ou égale à la première fréquence.

12. Système selon la revendication 8, dans lequel l'interface contrôle l'émetteur pour faire varier l'amplitude du signal à bande étroite modifiée.

13. Système selon la revendication 8, dans lequel l'interface fait varier une fréquence du signal à bande étroite émis dans la formation pour obtenir le signal modifié à bande étroite comprenant un spectre de fréquences.

14. Produit de type programme informatique comprenant un support non transitoire lisible par ordinateur contenant un code de programme informatique lisible par ordinateur enregistré sur celui-ci qui, lorsqu'il est exécuté par un ordinateur, configure l'ordinateur pour :

transmettre un signal à bande étroite dans une formation grâce à un émetteur situé dans un puits de forage, le signal à bande étroite étant modifié par passage à travers la formation et la formation réfléchissant au moins une partie du signal à bande étroite vers le puits de forage, ce qui donne un signal modifié à bande étroite présentant une première fréquence, le signal modifié à bande étroite étant détecté par un guide d'ondes optiques positionné dans le puits de forage ;

programmer une interface pour qu'elle transmette un signal source le long d'une longueur du guide d'ondes optiques et obtenir un signal de retour rétrodiffusé à partir du guide d'ondes optiques, le signal de retour rétrodiffusé étant échantillonné à une deuxième fréquence qui est inférieure à un débit Nyquist du signal modifié à bande étroite ; et

programmer l'interface pour traiter le signal de retour rétrodiffusé pour obtenir une amplitude du signal à bande étroite modifié.

15. Produit de type programme informatique selon la revendication 14, l'ordinateur étant configuré pour programmer l'interface pour traiter le signal de retour rétrodiffusé de sorte que l'amplitude du signal à bande étroite modifié s'obtient indépendamment de la première fréquence du signal à bande étroite modifié.

16. Produit de type programme informatique selon la revendication 14, l'ordinateur étant en outre configuré pour programmer l'interface pour traiter le signal de retour rétrodiffusé selon des techniques de modulation de phase interférométrique.

17. Produit de type programme informatique selon la revendication 14, l'ordinateur étant en outre configuré pour programmer l'interface pour qu'elle filtre le signal de retour rétrodiffusé à l'aide d'un filtre passe-bas présentant une fréquence de coupure inférieure ou égale à la première fréquence.

18. Produit de type programme informatique selon la revendication 14, l'ordinateur étant en outre configuré pour programmer l'interface pour contrôler l'émetteur pour faire varier l'amplitude du signal à bande étroite modifié.

19. Produit de type programme informatique selon la revendication 14, l'ordinateur étant en outre configuré pour faire varier une fréquence du signal à bande étroite émis dans la formation pour obtenir le signal modifié à bande étroite comprenant un spectre de fréquences.

1/7

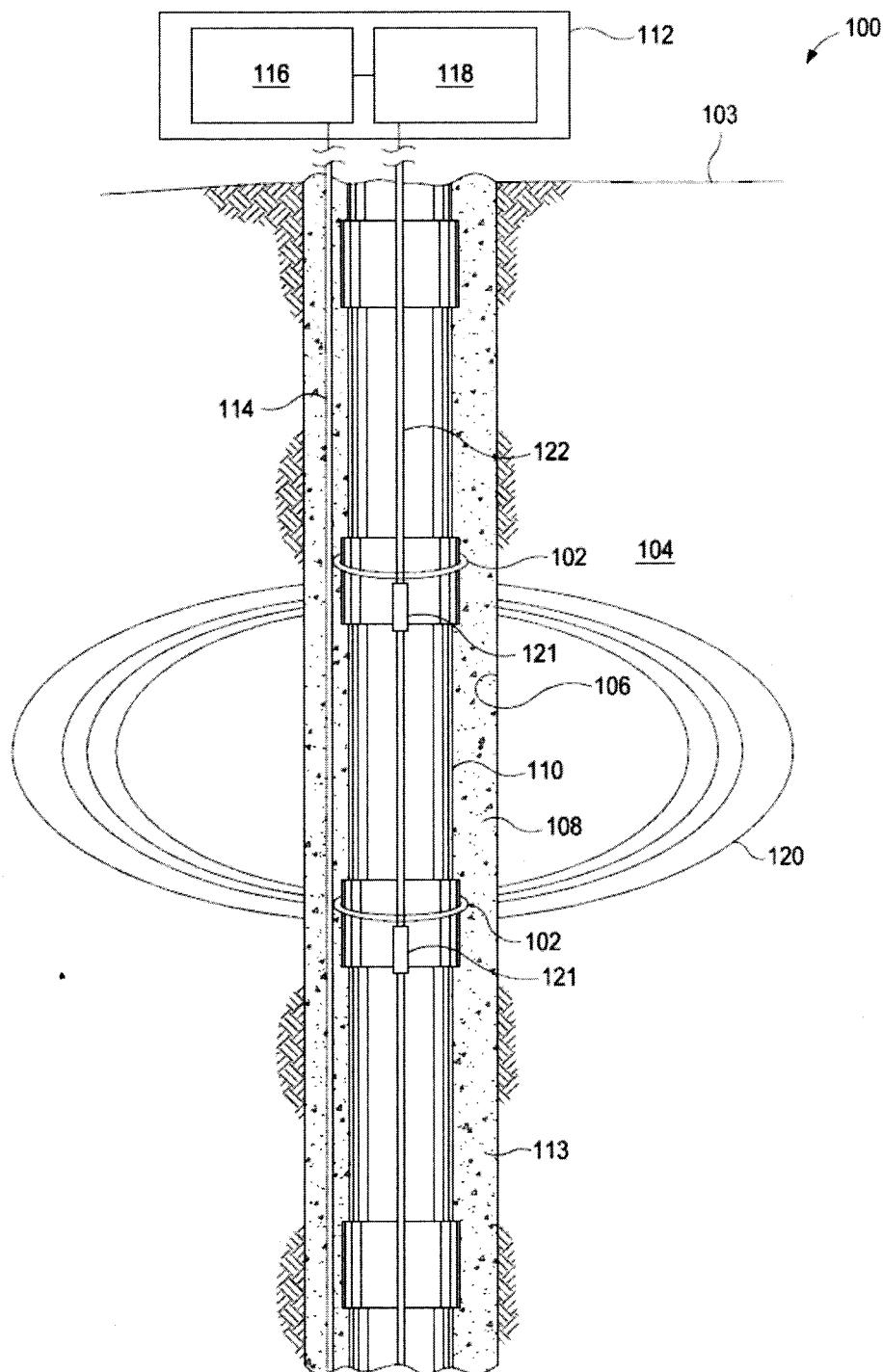


FIG. 1A

2/7

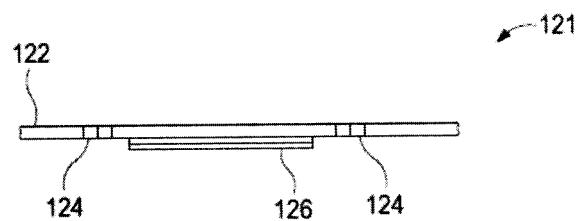


FIG. 1B

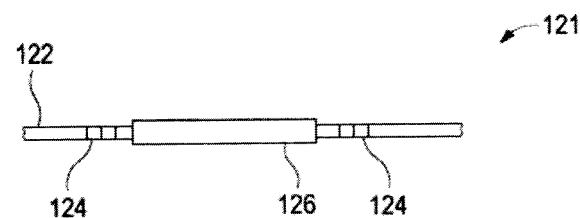


FIG. 1C

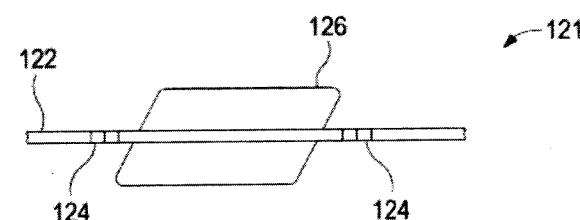


FIG. 1D

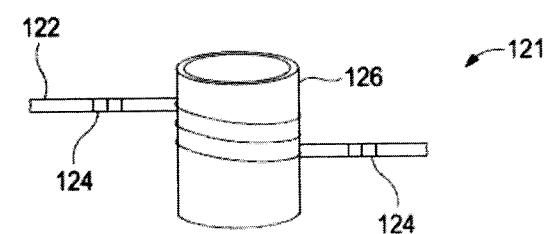


FIG. 1E

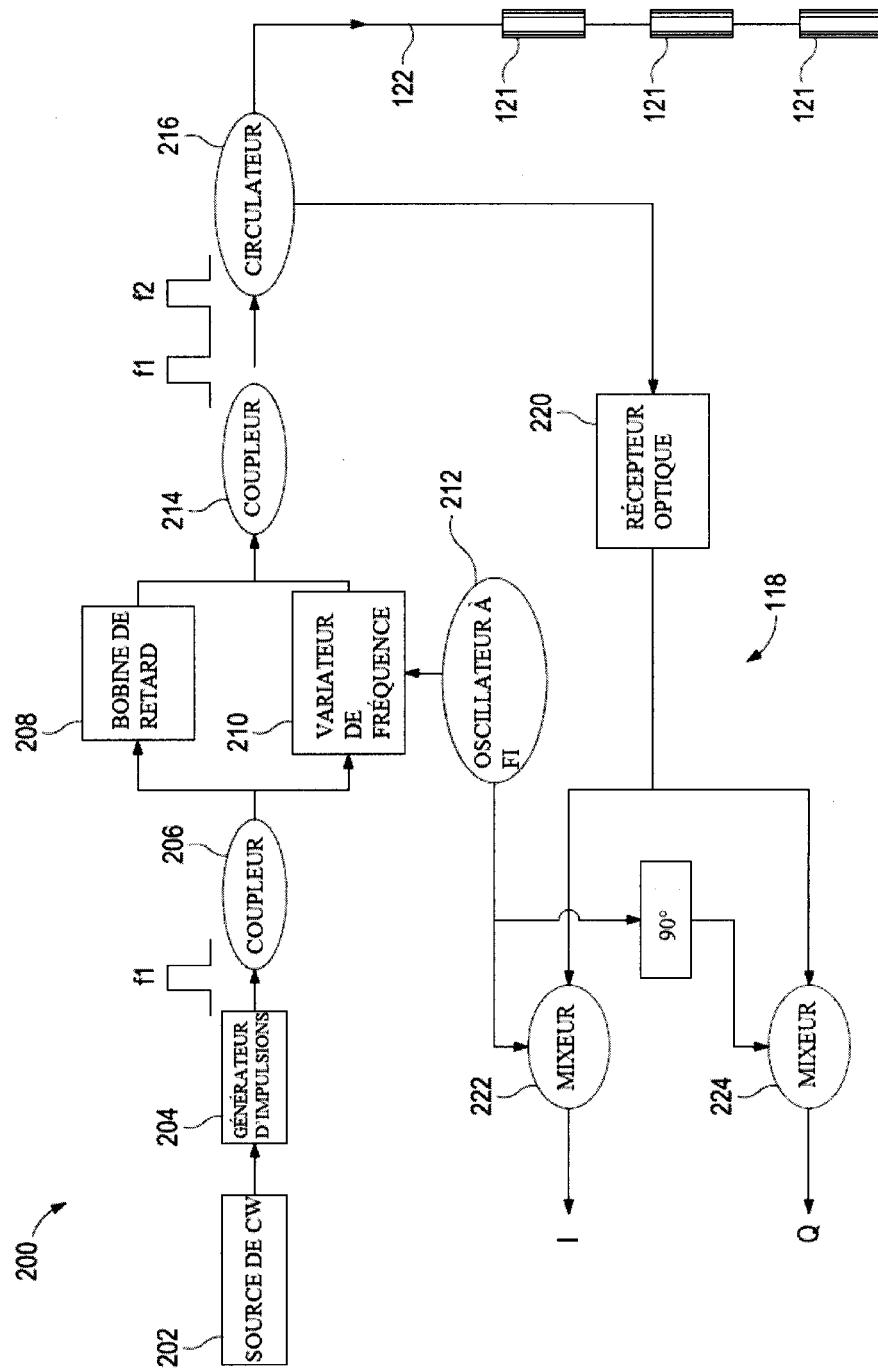


FIG. 2

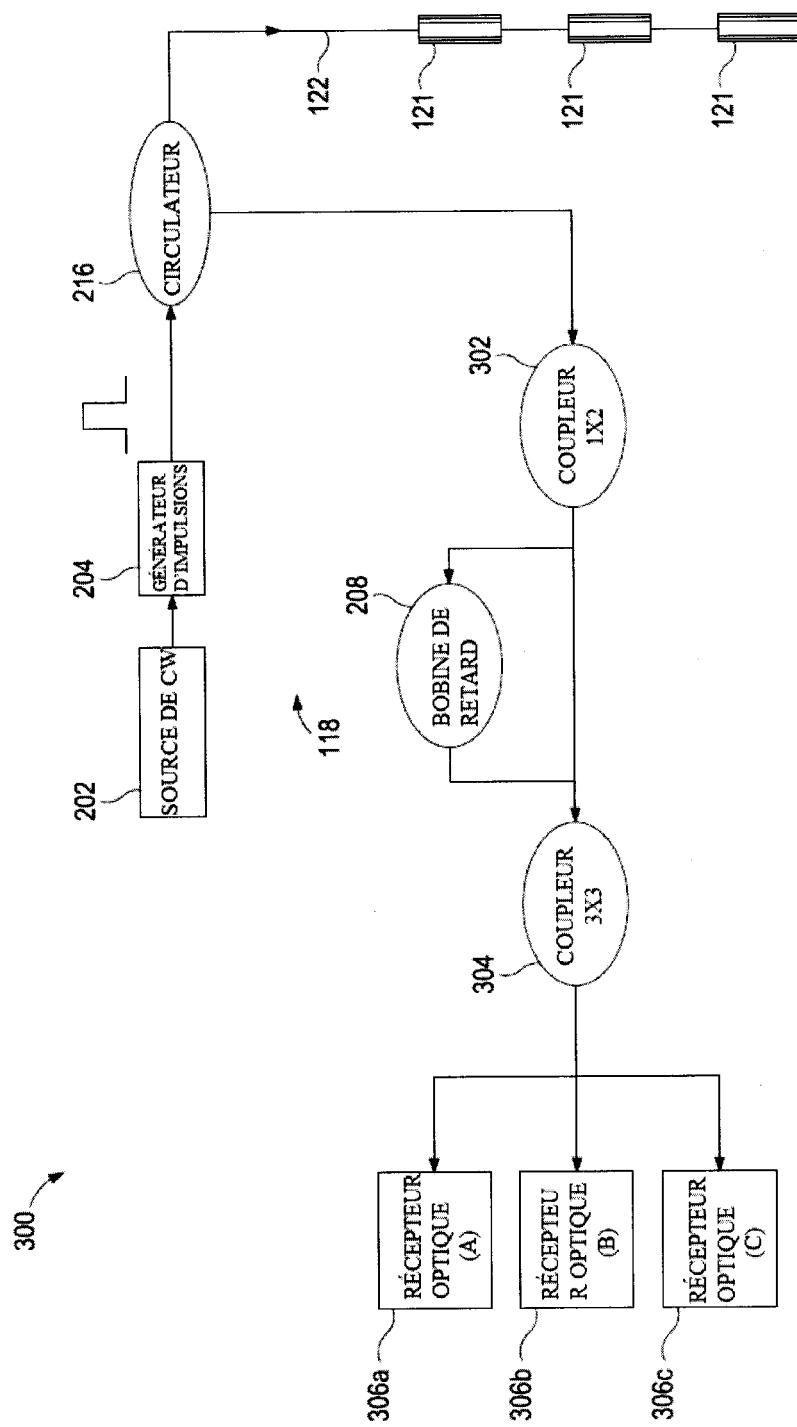


FIG. 3

5/7

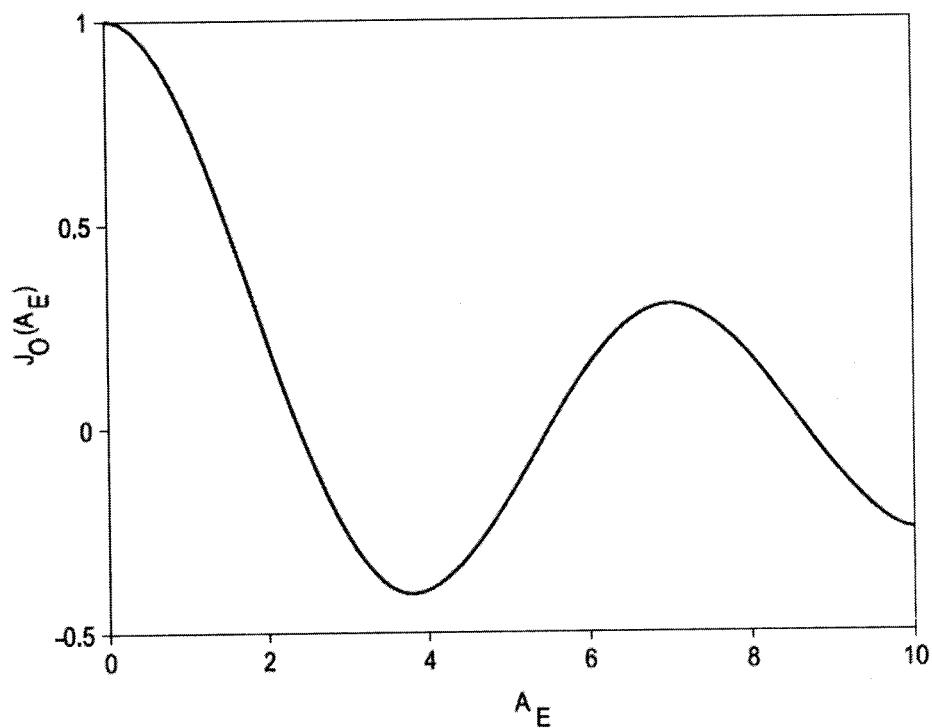


FIG. 4

500

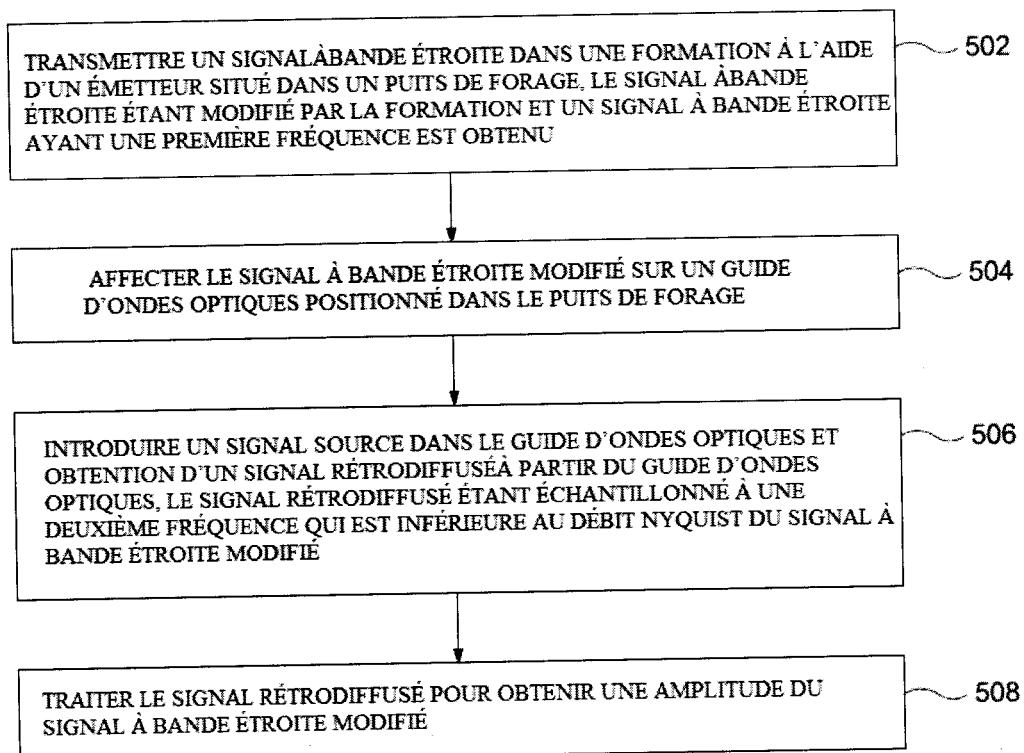


FIG. 5

7/7

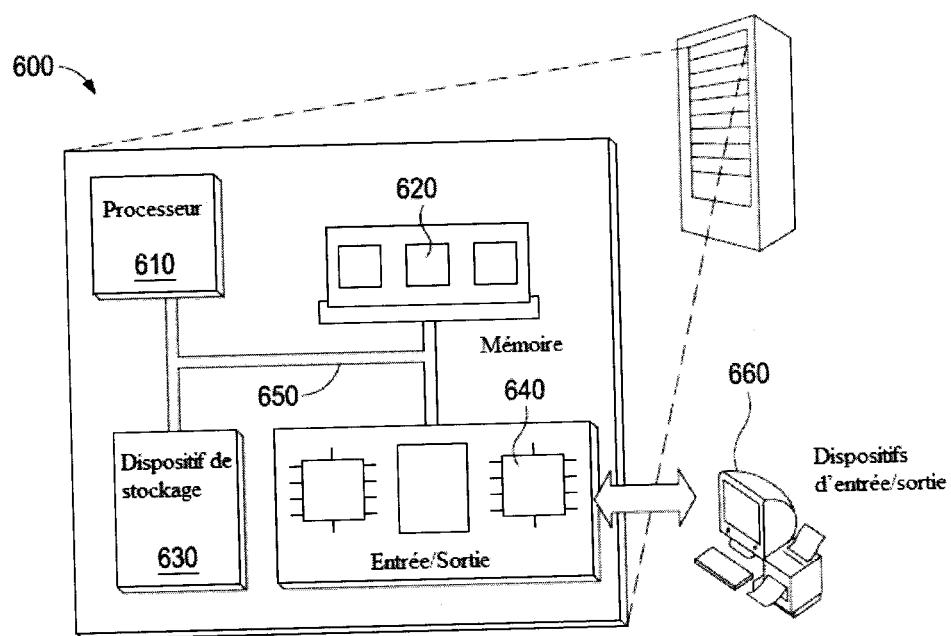


FIG. 6