

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) Nº de publication :

3 057 606

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

(21) Nº d'enregistrement national :

17 58468

(51) Int Cl⁸ : **E 21 B 47/10** (2018.01)

(12)

BREVET D'INVENTION

B1

(54) SYSTEMES ET PROCEDES D UTILISATION D UN CAPTEUR POUR FOURNIR UNE RESOLUTION SPATIALE DANS LA DETECTION DE FUITE EN FOND DE PUITS.

(22) Date de dépôt : 13.09.17.

(30) Priorité : 13.10.16 IB WOUS2016056895.

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

Demande(s) d'extension :

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

(43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 20.04.18 Bulletin 18/16.

(45) Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 17.01.20 Bulletin 20/03.

(72) Inventeur(s) : ANG YI YANG, NGUYEN NAM, LIE JONI, LU YINGHUI et TAWARE AVINASH VINAYAK.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

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

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

FR 3 057 606 - B1



SYSTÈMES ET PROCÉDÉS D'UTILISATION D'UN CAPTEUR POUR FOURNIR UNE RÉSOLUTION SPATIALE DANS LA DÉTECTION DE FUITE EN FOND DE PUITS

CONTEXTE DE L'INVENTION

[0001] La présente divulgation concerne généralement des systèmes et des procédés d'utilisation d'au moins un capteur pour fournir une résolution spatiale dans la détection de fuite en fond de puits.

[0002] Un puits de forage est souvent foré à proximité d'un gisement souterrain de ressources d'hydrocarbures pour faciliter l'exploration et la production des ressources d'hydrocarbures. Les sections de tubage sont souvent accouplées les unes aux autres pour s'étendre sur toute la longueur d'un tubage (par exemple, un tubage de production, un tubage intermédiaire ou un tubage de surface) qui est déployé dans le puits de forage pour isoler les outils de fond de puits et les trains déployés dans le tubage ainsi que les ressources d'hydrocarbures s'écoulant à travers le tubage en provenance de la formation environnante, pour prévenir les effondrements, et/ou pour prévenir la contamination de la formation environnante.

15 Un travail de cimentation est habituellement réalisé pour fixer fermement le tubage au puits de forage et pour former une barrière qui isole les différentes zones du puits de forage. Au cours du temps, le tubage et/ou la gaine de ciment peuvent s'affaiblir, et une ou plusieurs fuites peuvent se former au niveau de différentes sections du tubage et/ou de la gaine de ciment. Les fluides du réservoir qui étaient auparavant isolés du tubage ou isolés d'une ou plusieurs sections du tubage

20 par la gaine de ciment peuvent fuir à travers la gaine de ciment et peuvent affecter l'intégrité du puits et compromettre la production d'hydrocarbures.

[0003] Des capteurs sont parfois déployés en fond de puits pour surveiller les fuites. Par exemple, des capteurs sont parfois mélangés avec le ciment et sont déployés fixement le long du ciment. Bien que des capteurs stationnaires puissent être utilisés pour déetecter les fuites, parfois, les capteurs stationnaires ne sont pas déployés à proximité des fuites, et ainsi ne fournissent pas d'informations précises relatives à l'emplacement des fuites. Un réseau de multiples capteurs (réseau de capteurs) est parfois déployé le long d'un tubage de production, qui s'étend vers le bas du puits de forage. Un ou plusieurs capteurs du réseau de capteurs peuvent être positionnés à proximité de la fuite et ainsi être capables de détecter la fuite. Les mesures effectuées par les différents capteurs du réseau de capteurs peuvent également être comparées pour obtenir des informations plus précises relatives à la fuite. Cependant, les coûts associés à l'installation de multiples capteurs le long d'un tubage de production, au déploiement des multiples capteurs, et au fonctionnement des multiples capteurs augmentent proportionnellement

avec le nombre de capteurs déployés dans le réseau de capteurs. En outre, dans certains environnements de puits de forage, il peut être difficile et/ou peu pratique de déployer de multiples capteurs, affectant ainsi la précision de la détection de fuite du réseau de capteurs. En outre, un ou plusieurs capteurs du réseau de capteurs peuvent mal fonctionner, ce qui peut également avoir une incidence négative sur la précision des informations relatives aux fuites obtenues par le réseau de capteurs.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

[0004] Les figures suivantes sont incluses pour illustrer certains aspects de la présente divulgation, et ne doivent pas être considérées comme des modes de réalisation exclusifs. L'objet divulgué admet des modifications considérables, des transformations, des combinaisons, et des équivalents de forme et de fonction, sans s'écartez de la portée de la présente divulgation.

[0005] La Figure 1A est une vue latérale schématique d'un environnement de diagraphie par ligne câblée dans lequel un détecteur de fuite doté d'un capteur physique permettant de détecter les fuites le long d'un puits de forage est déployé sur une ligne câblée dans le puits de forage ;

[0006] La Figure 1B est une vue latérale schématique d'un environnement de diagraphie en cours de forage (LWD) dans lequel le détecteur de fuite de la Figure 1A est déployé dans le puits de forage pour détecter les fuites le long du puits de forage ;

[0007] La Figure 2 illustre un schéma fonctionnel des composants du détecteur de fuite en fond de puits de la Figure 1 ;

[0008] La Figure 3A illustre une vue schématique du capteur physique de la Figure 1 à l'instant $t=0$ tandis que le capteur physique se déplace le long d'un axe longitudinal (axe des z) du puits de forage à une vitesse égale à v ;

[0009] La Figure 3B illustre un réseau de capteurs virtuels formés sur la base du capteur physique de la Figure 3A tandis que le capteur physique se déplace le long de l'axe des z, un axe longitudinal du puits de forage à une vitesse v ; et

[0010] La Figure 4 illustre un schéma fonctionnel d'un procédé d'utilisation d'un réseau virtuel formé à partir d'un capteur physique (un réseau de capteurs) tel que le capteur physique de la Figure 1 pour calculer un spectre spatial indiquant un emplacement de la fuite, telle que la première fuite de la Figure 1.

[0011] Les figures illustrées sont seulement des exemples et ne sont pas destinées à affirmer ou à impliquer une quelconque limitation en ce qui concerne

l'environnement, l'architecture, la conception ou le procédé dans lequel les différents modes de réalisation peuvent être mis en œuvre.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES MODES DE RÉALISATION ILLUSTRATIFS

5 [0012] Dans la description détaillée suivante des modes de réalisation illustratifs, une référence est faite aux dessins annexés qui en font partie. Ces modes de réalisation sont décrits de manière suffisamment détaillée pour permettre au spécialiste du domaine de pratiquer l'invention, et il est entendu que d'autres modes de réalisation peuvent être utilisés et que des changements structuraux, mécaniques, électriques et chimiques logiques 10 peuvent être effectués sans s'écartez de l'esprit et de la portée de l'invention. Pour éviter les détails superflus pour permettre au spécialiste du domaine de pratiquer les modes de réalisation décrits dans le présent document, la description peut omettre certaines informations connues du spécialiste du domaine. Par conséquent, la description détaillée suivante ne doit pas être envisagée dans un sens limitatif, et la portée des modes de réalisation illustratifs n'est définie que 15 par les revendications annexées.

[0013] La présente divulgation concerne des systèmes et des procédés d'utilisation d'au moins un capteur physique pour fournir une résolution spatiale dans la détection de fuite, ainsi que des détecteurs de fuite en fond de puits comportant au moins un capteur physique et pouvant fournir une résolution spatiale dans la détection de fuite. Tel que défini ici, 20 un capteur physique est un capteur réel qui est déployé dans un puits de forage d'un environnement de fond de puits et qui permet de détecter les fuites en fond de puits le long du puits de forage. Plus particulièrement, le capteur physique est déployé le long d'un train rétractable, tel qu'un train d'outils de ligne câblée, un train d'outils de câble lisse, un train de forage ou un autre type de train d'outils permettant de déployer le capteur physique. Le train 25 d'outils rétractable peut être déployé dans un puits de forage et retiré du puits de forage pour faciliter le déplacement du détecteur de fuite entre un emplacement de surface et une profondeur souhaitée du puits de forage. Dans certains modes de réalisation, le capteur physique est un hydrophone qui permet d'obtenir des signaux acoustiques indiquant la fuite et provenant d'une source de la fuite. Dans d'autres modes de réalisation, le capteur physique est une fibre optique 30 qui permet de réaliser une détection acoustique distribuée (DAS) ou une détection de contraintes distribuée des perturbations causées par la fuite. Dans d'autres modes de réalisation, le capteur physique est un détecteur électromagnétique qui permet d'obtenir des signaux acoustiques indiquant la fuite et provenant de la source de la fuite. Dans encore d'autres modes de réalisation,

le capteur physique est un détecteur chimique qui permet de détecter des déséquilibres chimiques causés par la fuite.

[0014] Tandis que le détecteur de fuite remonte et/ou descend dans le puits de forage, le capteur physique permet d'obtenir des signaux physiques indiquant la fuite 5 telle que détectée par le capteur physique. Tel que défini ici, « remonter dans le puits de forage » et « descendre dans le puits de forage » signifie se déplacer le long du puits de forage vers une extrémité superficielle du puits de forage, et se déplacer le long du puits de forage en s'éloignant de l'extrémité superficielle du puits de forage, respectivement. Le détecteur de fuite permet en 10 outre de réaliser une opération de décomposition en valeurs singulières des signaux physiques détectés par le capteur physique. Dans certains modes de réalisation, l'opération de décomposition en valeurs singulières permet d'obtenir une pluralité de signaux virtuels associés à un réseau de capteurs virtuels, où chaque capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels est situé à une distance virtuelle par rapport au capteur physique. Tel que défini ici, un capteur virtuel est 15 déployé à un emplacement virtuel et à une distance virtuelle du capteur physique, où l'emplacement virtuel et la distance virtuelle ont des valeurs qui sont identiques aux valeurs d'un emplacement physique et d'une distance physique du capteur physique, respectivement. En outre, le capteur virtuel est un capteur qui reproduit un capteur physique de sorte que les signaux virtuels associés au capteur virtuel sont approximativement égaux aux signaux physiques qu'un capteur physique détecterait si le capteur physique était situé à un emplacement physique 20 correspondant à l'emplacement virtuel du capteur virtuel. Par exemple, le détecteur de fuite permet de réaliser l'opération de décomposition en valeurs singulières pour obtenir des signaux virtuels pour huit capteurs virtuels, situés à l'emplacement du capteur physique et au moins à D-7D de l'emplacement du capteur physique, où D est une valeur numérique d'une distance physique du capteur physique. Les signaux virtuels de chaque capteur virtuel des huit capteurs 25 virtuels sont approximativement égaux aux signaux physiques obtenus par le capteur physique si le capteur physique est situé à l'emplacement du capteur virtuel respectif.

[0015] Le détecteur de fuite est alors en corrélation avec les signaux virtuels obtenus. Par exemple, le détecteur de fuite construit une matrice de covariance des signaux virtuels obtenus par l'opération de décomposition en valeurs singulières. Le détecteur de 30 fuite ajuste alors les valeurs obtenues d'après la matrice de covariance pour synchroniser la pluralité de signaux virtuels. Le détecteur de fuite calcule alors un spectre spatial indiquant un emplacement d'une fuite sur la base des signaux virtuels synchronisés et utilise une technique de formation de faisceaux, telle que la formation de faisceaux traditionnelle, la formation de faisceaux de Capon, MUSIC, l'analyse paramétrique, l'analyse azimutale, et les techniques 35 similaires pour déterminer un pic localisé du spectre spatial, où le pic localisé indique

l'emplacement de la fuite. Des descriptions supplémentaires des procédés précédents, des exemples de formules, et des exemples sont fournis dans les paragraphes ci-dessous et sont illustrés par au moins les Figures 1 à 4. En outre, bien que les opérations précédentes soient décrites pour être réalisées par le détecteur de fuite, les opérations peuvent également être réalisées par un processeur d'un autre dispositif électronique, tel qu'un dispositif de commande en surface qui est connecté en communication au capteur physique et qui peut recevoir les signaux physiques détectés par le capteur physique.

5 [0016] En considérant maintenant les figures, la Figure 1A est une vue latérale schématique d'un environnement de diagraphie par ligne câblée 100 dans lequel un détecteur de fuite 118 doté d'un capteur physique 122 permettant de détecter les fuites le long d'un puits de forage 106 est déployé sur une ligne câblée 119 dans le puits de forage 106. Dans le mode de réalisation de la Figure 1, un puits 102 comportant le puits de forage 106 s'étend depuis une surface 108 du puits 102 jusque ou à travers une formation souterraine 112. Un tubage 116 est déployé le long du puits de forage 106 pour isoler les outils de fond de puits et les trains déployés dans le tubage 116, pour fournir un trajet aux ressources d'hydrocarbures s'écoulant en provenant de la formation souterraine 112, pour prévenir les effondrements, et/ou pour prévenir la contamination de la formation environnante 112. Le tubage 116 est normalement entouré d'une gaine de ciment 126, qui est déposée dans un espace annulaire entre le tubage 116 et le puits de forage 106 pour fixer fermement le tubage 116 au puits de forage 106 et pour former une 10 barrière qui isole le tubage 116. Bien que cela ne soit pas décrit, il peut exister des couches de tubage placées de manière concentrique dans le puits de forage 106, chacune comportant une couche de ciment ou autre déposée autour de celle-ci.

15

20 [0017] Un véhicule 180 transportant la ligne câblée 119 est positionné à proximité du puits 102. La ligne câblée 119 en même temps que le détecteur de fuite 118 et le capteur physique 122 sont descendus par le bloc obturateur 103 dans le puits 102. Les données indiquant les mesures obtenues par le capteur physique 122 et/ou traitées par le détecteur de fuite 118 peuvent être transmises via la ligne câblée 119 ou via un autre système de télémétrie à la surface 108 en vue du traitement par le dispositif de commande 184 ou par un autre dispositif électronique servant à traiter les données obtenues par le capteur physique 122 et le détecteur de fuite 118. Dans le mode de réalisation de la Figure 1A, le dispositif de commande 184 est stocké 25 sur le véhicule 180. Dans certains modes de réalisation, le dispositif de commande 184 peut également être logé dans une installation temporaire et/ou permanente (non représentée) à proximité du puits 102. Dans d'autres modes de réalisation, le dispositif de commande 184 peut également être déployé à distance du puits 102. Des opérations supplémentaires du dispositif de commande 184 sont fournies dans les paragraphes suivants.

30

35

[0018] La Figure 1B est une vue latérale schématique d'un environnement de diagraphie en cours de forage (LWD) 150 dans lequel le détecteur de fuite 118 de la Figure 1A est déployé dans le puits de forage 106 pour détecter les fuites le long du puits de forage 106. Dans le mode de réalisation de la Figure 1B, un crochet 138, un câble 142, un mousle mobile 5 (non représenté) et un appareil de levage (non représenté) sont fournis pour faire descendre un train d'outils 120 dans le puits de forage 106 ou pour retirer le train d'outils 120 du puits de forage 106. Le train d'outils 120 peut être un train de forage, ou un autre type de train d'outils permettant de déployer le détecteur de fuite 118. Au niveau de la tête de puits 136, un conduit d'entrée 152 est accouplé à une source de fluides (non représentée) pour fournir des fluides, tels 10 que des fluides de forage, en fond de puits. Le train d'outils 120 comporte un espace annulaire interne qui fournit un trajet d'écoulement de fluide de la surface 108 jusqu'au détecteur de fuite 118. Le train d'outils 120 est accouplé au détecteur de fuite 118, qui dans le mode de réalisation de la Figure 1B, comprend le capteur physique 122. Les fluides descendent dans le train d'outils 120, et sortent du train d'outils 120 au niveau du trépan 124. Les fluides retournent vers la 15 surface 108 par un espace annulaire de puits de forage 148 et sortent de l'espace annulaire du puits de forage 148 via un conduit de sortie 164 où les fluides sont capturés dans un réservoir 140.

[0019] Le capteur physique 122 permet de détecter la présence de fuites, telle que la première fuite 132. Dans les exemples des Figures 1A et 1B, la première fuite 132 20 représente une fuite dans la gaine de ciment 126. Tandis que le capteur physique 122 se déplace le long de l'axe longitudinal du puits de forage 106, des signaux indiquant la première fuite 132 sont détectés (signaux physiques) par le capteur physique 122. Le détecteur de fuite 118 réalise une opération de décomposition en valeurs singulières sur les signaux physiques détectés par le capteur physique 122 pour obtenir des signaux virtuels associés à un réseau de capteurs virtuels 25 et construit une matrice de covariance de la pluralité de signaux virtuels. Le détecteur de fuite 118 ajuste alors la matrice de covariance pour synchroniser la pluralité de signaux virtuels. Dans certains modes de réalisation, pour chaque capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels, le détecteur de fuite 118 détermine un vecteur d'orientation réel des signaux virtuels correspondant 30 au capteur virtuel respectif, et applique le vecteur d'orientation réel à une ou plusieurs valeurs de la matrice de covariance qui représente les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel respectif. Dans d'autres modes de réalisation, pour chaque capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels, le détecteur de fuite 118 détermine également un facteur de correction temporel des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel respectif. Dans de tels modes de réalisation, le détecteur de fuite 118 détermine également une fonction de transfert modélisée des signaux 35 virtuels correspondant au capteur virtuel respectif. Le détecteur de fuite 118 calcule alors un

poids virtuel du capteur virtuel respectif par rapport au capteur physique sur la base du facteur de correction temporel déterminé et de la fonction de transfert modélisée des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel respectif. Le détecteur de fuite 118 applique alors le vecteur d'orientation réel et le poids virtuel à une ou plusieurs valeurs de la matrice de covariance qui 5 représentent les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel respectif.

[0020] Le détecteur de fuite 118 calcule alors un spectre spatial indiquant un emplacement de la première fuite 132 sur la base des signaux virtuels synchronisés. Dans certains modes de réalisation, le détecteur de fuite 118 utilise une technique de formation de faisceaux pour déterminer un pic localisé du spectre spatial, où le pic localisé indique 10 l'emplacement de la première fuite 132. Les exemples des techniques de formation de faisceaux comprennent la formation de faisceaux traditionnelle, la formation de faisceaux de Capon, MUSIC, l'analyse paramétrique, l'analyse azimutale, et les techniques similaires pour déterminer un pic localisé. Dans certains modes de réalisation, le détecteur de fuite 118 permet en outre de déterminer une distance radiale approximative de la première fuite 132 par rapport au capteur 15 physique 122. Dans l'un de tels modes de réalisation, la distance radiale comprend une première composante ayant une valeur le long d'un premier axe des x, et comprend une seconde composante ayant une valeur le long d'un second axe des y, où l'axe des x et l'axe des y sont des axes perpendiculaires qui forment un plan qui est approximativement perpendiculaire à un axe longitudinal (axe des z) du puits de forage 106. Par exemple, si le capteur physique 122 est 20 positionné à $(x, y) = (0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, la distance radiale de la première fuite 132 peut indiquer que la première fuite 132 est $(2 \text{ m}, 3 \text{ m})$ par rapport au capteur physique 122. Dans un autre de tels modes de réalisation, la distance radiale comprend une première composante ayant une valeur le long d'un premier axe des x, une deuxième composante ayant une valeur le long d'un second axe des y, et une troisième composante ayant une valeur le long d'un second axe des z, où l'axe des x 25 et l'axe des y sont des axes perpendiculaires qui forment un plan qui est approximativement perpendiculaire à un axe longitudinal (axe des z) du puits de forage 106. Par exemple, si le capteur physique 122 est positionné à $(x, y, z) = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, la distance radiale de la première fuite 132 peut indiquer que la première fuite 132 est $(2 \text{ m}, 3 \text{ m}, 5 \text{ m})$ par rapport au capteur physique 122. Dans d'autres modes de réalisation, le détecteur de fuite 118 permet en 30 outre de déterminer un ou plusieurs angles de la première fuite 132 par rapport au capteur physique 122. Dans l'un de tels modes de réalisation, un angle de la première fuite 132 indique un azimut de la première fuite 132 par rapport au capteur physique 122. Dans un autre de tels modes de réalisation, un angle de la fuite 132 indique l'altitude de la fuite 132 par rapport au capteur physique 122.

[0021] Bien que le détecteur de fuite 118 ait été décrit jusqu'à présent comme servant à réaliser les opérations décrites dans les paragraphes précédents, dans un ou plusieurs modes de réalisation les opérations précédentes peuvent également être totalement ou partiellement réalisées par d'autres dispositifs électroniques de surface ou de fond de puits connectés en communication au détecteur de fuite 118 et servant à recevoir les signaux physiques détectés par le capteur physique 122. Par exemple, le dispositif de commande 184, qui est formé par un ou plusieurs dispositifs électroniques, permet de recevoir les signaux physiques détectés et de réaliser les opérations précédentes pour calculer un spectre spatial indiquant l'emplacement de la première fuite 132. Des descriptions supplémentaires des algorithmes utilisés pour réaliser les opérations précédentes sont fournies dans les paragraphes ci-dessous et sont illustrées par au moins les Figures 2 à 4. En outre, bien que les Figures 1A et 1B illustrent le détecteur de fuite 118 et le capteur 122 déployé dans deux exemples d'environnements, le détecteur de fuite 118 et le capteur 122 peuvent être déployés dans divers environnements de forage, de complétion et de production. En outre, bien que les Figures 1A et 1B illustrent le détecteur de fuite 118 comportant un capteur 122, dans certains modes de réalisation, le détecteur de fuite 118 permet d'utiliser les mesures obtenues par de multiples capteurs (non représentés) pour réaliser les opérations décrites dans le présent document pour obtenir une pluralité de capteurs virtuels, synchroniser les signaux virtuels de la pluralité de capteurs virtuels, et pour calculer un spectre spatial indiquant un emplacement de la première fuite 132 ou d'une autre fuite dans le puits de forage 106 sur la base des signaux virtuels synchronisés.

[0022] La Figure 2 illustre un schéma fonctionnel des composants du premier détecteur de fuite en fond de puits 118 de la Figure 1. Le détecteur de fuite en fond de puits 118 comprend le capteur physique 122. Dans certains modes de réalisation, le capteur physique 122 est un hydrophone qui permet d'obtenir des signaux acoustiques (signaux physiques) indiquant la fuite et provenant d'une source de la fuite. Dans d'autres modes de réalisation, le capteur physique 122 est une fibre optique qui permet de réaliser une DAS ou une détection de contraintes distribuée des perturbations causées par la fuite pour détecter les signaux physiques. Dans d'autres modes de réalisation, le capteur physique 122 est un capteur électromagnétique permettant de transmettre des signaux électromagnétiques qui se déplacent le long de la formation souterraine 112, et de détecter les variations des signaux électromagnétiques transmis ainsi que les signaux électromagnétiques secondaires induits par la première fuite 132 et/ou par la formation souterraine 112. Dans d'autres modes de réalisation, le capteur physique 122 permet de détecter les signaux de résonance magnétique nucléaire des particules de la formation souterraine 112 et/ou des fluides s'écoulant à travers la première fuite 132. Dans d'autres modes de réalisation, le capteur physique 122 permet de détecter un ou plusieurs parmi

une vibration, un déplacement, une vitesse, un couple, une accélération, une conductivité, une impédance acoustique, et d'autres propriétés du puits de forage 106 à un emplacement proche de la première fuite 132.

[0023] Le détecteur de fuite 118 comprend également un support de stockage 206. Le support de stockage 206 est un support lisible par une machine et peut être formé à partir de composants de stockage de données tels que, mais sans s'y limiter, une mémoire morte (ROM), une mémoire vive (RAM), une mémoire flash, des disques durs magnétiques, des disques durs à l'état solide, ainsi que d'autres types de composants et de dispositifs de stockage de données. Dans certains modes de réalisation, le support de stockage 206 comprend de multiples dispositifs de stockage de données. Les signaux physiques détectés par le capteur physique 122, ainsi que les signaux virtuels associés aux capteurs virtuels, sont stockés sur le support de stockage 206. Le support de stockage 206 comprend également des instructions d'utilisation du détecteur de fuite 118 ainsi que des instructions pour établir des communications avec les autres dispositifs électroniques en fond de puits et en surface tels que le dispositif de commande 184.

[0024] Le détecteur de fuite 118 comprend également un processeur 210 qui permet d'exécuter les instructions stockées dans le support de stockage 206 pour obtenir les signaux physiques détectés par le capteur physique 122 tandis que le capteur physique 122 se déplace le long du puits de forage 106. Le processeur 210 permet également de réaliser une opération de décomposition en valeurs singulières sur les signaux physiques du capteur physique 122 pour obtenir une pluralité de signaux virtuels associés à un réseau de capteurs virtuels. Le processeur 210 permet en outre de construire une matrice de covariance de la pluralité des signaux virtuels obtenus à partir de l'opération de décomposition en valeurs singulières. Le processeur 210 permet en outre d'ajuster les valeurs de la matrice de covariance pour synchroniser la pluralité des signaux virtuels. Le processeur 210 permet en outre de calculer un spectre spatial indiquant un emplacement de la fuite sur la base des signaux virtuels synchronisés. Le processeur 210 permet en outre d'utiliser une technique de formation de faisceaux divulguée dans le présent document pour déterminer un pic localisé du spectre spatial, où le pic localisé indique l'emplacement de la fuite. Dans l'un de tels modes de réalisation, le processeur 210 est logé à l'intérieur d'un tubage du détecteur de fuite 118.

[0025] Bien que la Figure 2 illustre le processeur 210 en tant que composant du détecteur de fuite 118, dans d'autres modes de réalisation, un processeur d'un dispositif électronique de surface (processeur de surface), tel que le dispositif de commande 184 permet également de réaliser les opérations du processeur 210. Dans l'un de tels modes de réalisation, les signaux physiques obtenus par le capteur 122 sont transmis au dispositif de

commande 184 via un ou plusieurs systèmes de télémétrie de fond de puits. Le processeur de surface permet de réaliser les opérations décrites dans le présent document pour réaliser une opération de décomposition en valeurs singulières sur les signaux physiques pour obtenir une pluralité de signaux virtuels associés à un réseau de capteurs virtuels, construire une matrice de covariance de la pluralité des signaux virtuels obtenus à partir de l'opération de décomposition en valeurs singulières, ajuster les valeurs de la matrice de covariance pour synchroniser la pluralité de signaux virtuels, calculer un spectre spatial indiquant un emplacement de la fuite sur la base des signaux synchronisés, utiliser la formation de faisceaux pour déterminer un pic localisé du spectre spatial, ainsi que d'autres opérations décrites dans le présent document. Dans d'autres modes de réalisation, le processeur 210 est un sous-composant du capteur physique 122. Dans d'autres modes de réalisation, le processeur 210 est un composant distinct qui est déployé au niveau d'un emplacement en fond de puits et qui permet de réaliser les opérations décrites dans le présent document pour calculer le spectre spectral indiquant l'emplacement de la première fuite 132. Dans chacun des modes de réalisation précédents, le processeur 210 et le détecteur de fuite 118 forment un système de détection de fuite qui réalise les opérations décrites dans le présent document pour calculer un spectre spatial indiquant un emplacement d'une fuite sur la base des signaux virtuels synchronisés.

[0026] La Figure 3A illustre une vue schématique du capteur physique 122 de la Figure 1 à l'instant $t=0$ tandis que le capteur physique 122 se déplace le long d'un axe longitudinal (axe des z) 302 du puits de forage à une vitesse égale à v . À l'instant $t=0$, l'emplacement du capteur physique 122 le long d'un axe des r 304 et de l'axe des z 302 est $(0, 0)$. Tandis que le capteur physique 122 se déplace le long de l'axe des z, des échantillons des signaux physiques détectés par le capteur physique 122 sont décomposés en utilisant une opération de décomposition en valeurs singulières pour obtenir de multiples valeurs singulières, où l'état quasi stationnaire de chaque valeur singulière peut être préservé. Un signal temporel discret est quasi stationnaire si ses statistiques de premier et de deuxième ordre sont finies et bien définies. Chaque valeur singulière des multiples valeurs singulières décomposées est utilisée pour former un capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels 322A-322H. La Figure 3B illustre un réseau de capteurs virtuels 322A-322H formé sur la base du capteur physique 122 de la Figure 3A tandis que le capteur physique 122 se déplace le long de l'axe des z 302, un axe longitudinal du puits de forage à la vitesse v . Chaque capteur virtuel est associé à des signaux virtuels, qui approximent les signaux physiques qui seraient détectés par le capteur physique 122 si le capteur physique 122 était à l'emplacement du capteur virtuel respectif. Une fois que le réseau de capteurs virtuels 322A-322H est formé, une matrice de covariance peut être construite en utilisant les signaux virtuels et peut ensuite être ajustée en utilisant une ou plusieurs

opérations décrites dans le présent document pour calculer un spectre spatial indiquant l'emplacement de la fuite.

[0027] La Figure 4 illustre un schéma fonctionnel d'un procédé 400 d'utilisation d'un réseau virtuel formé à partir d'un capteur physique (un réseau de capteurs) tel que le capteur physique 122 de la Figure 1 pour calculer un spectre spatial indiquant un emplacement d'une fuite, telle que la première fuite 132 de la Figure 1. Au niveau du bloc 402, des calculs initiaux sont réalisés pour déterminer la position initiale du capteur physique 122. Dans l'exemple de la Figure 4, le capteur physique 122 (m_1) est initialement situé à l'origine où l'emplacement du capteur physique 122 selon deux axes perpendiculaires x et y est exprimé par $(x, y) = (0, 0)$. Le capteur physique 122 permet de détecter un signal source d'une fuite dans un champ proche, $S_0(t)$, où le signal source de la fuite est situé à une position spatiale de $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0)$. En outre, le déplacement relatif Δr attribué au mouvement du capteur physique 122 ayant une vitesse de v à l'instant t peut être exprimé par $\Delta r(t) = vt$. En tant que tel, le signal reçu du capteur physique 122 peut être déterminé par l'équation suivante :

15

$$p_1(t) = a_1(\mathbf{r}_0 + \Delta\mathbf{r}(t))s_o(t) + q(t), \quad 0 \leq t \leq \Delta T, \quad \text{EQ. 1}$$

où $a_1(\cdot)$, désigne le vecteur d'orientation du signal vers le capteur physique 122 qui détermine la réponse en phase de la source acoustique à la position $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0)$, où y_0 désigne la distance perpendiculaire (ou rayon) de la source par rapport à l'axe des x et x_0 désigne la distance couverte le long de l'axe des x, où $q(t)$, est le bruit blanc gaussien superposé qui capture les effets du bruit thermique et environnemental, et où ΔT représente un cadre de fenêtre d'acquisition du capteur physique.

[0028] Au niveau du bloc 404, une opération de décomposition en valeurs singulières décomposant les signaux physiques détectés en multiples valeurs singulières est réalisée. Plus particulièrement, tandis que le capteur physique 122 entre dans le cadre de fenêtre d'acquisition ΔT , une décomposition en valeurs singulières peut être réalisée à l'intérieur de ΔT pour former un nombre N de capteurs virtuels. Au niveau du bloc 406A-406N, un réseau de N capteurs virtuels totaux est formé sur la base de l'opération de décomposition en valeurs singulières décrite dans le présent document. Une expression mathématique du réseau de N capteurs totaux peut être exprimée par l'équation suivante :

$$p_{1,n}(t) = p_1 \left(t + \frac{\Delta T}{N} (n - 1) \right) \text{ avec } 0 \leq t \leq \frac{\Delta T}{N}, \quad \text{EQ. 2}$$

où $n \in [1, N]$ est l'index spatial désignant le nombre de capteurs virtuels, N est le nombre total de capteurs virtuels du réseau virtuel, de sorte que $\Delta T/N$ satisfasse l'état quasi stationnaire. En outre, chaque capteur virtuel respectif de N capteurs virtuels est situé à $[\mathbf{m}_{1,1} \ \cdots \ \mathbf{m}_{1,N}]$, respectivement, où l'emplacement du capteur virtuel respectif peut être déterminé sur la base de l'équation suivante :

$$\mathbf{m}_{1,n} = \mathbf{m}_1 + \nu \frac{(n-\varepsilon)\Delta T}{N} \quad \text{EQ. 3}$$

où $\varepsilon \in (0,1]$ est le pourcentage du décalage par rapport à l'origine.

[0029] Les signaux virtuels associés aux N capteurs virtuels positionnés à $[\mathbf{m}_{1,1} \ \cdots \ \mathbf{m}_{1,N}]$ exprimés sur la base de $p_{1,n}(t)$ peuvent être exprimés sur la base de l'équation suivante :

$$\mathbf{p}_1(t) = [p_{1,1}(t) \ \cdots \ p_{1,N}(t)] \text{ avec } 0 \leq t \leq \frac{\Delta T}{N} \quad \text{EQ. 4}$$

15 4

Dans certains modes de réalisation, lorsque le capteur physique 122 se déplace à la vitesse v , le capteur physique 122 se déplace également avec une fenêtre d'acquisition de $\Delta T = Nd/v$ pour construire un réseau virtuel comportant N capteurs présentant un espacement entre les éléments de d , où d est l'espacement entre les éléments de capteurs virtuels.

[0030] Au niveau du bloc estimateur de la matrice de covariance 408, une matrice de covariance de la pluralité de signaux virtuels est construite à partir des signaux virtuels obtenus d'après l'EQ. 4. est construite d'après la pluralité de signaux virtuels. Plus particulièrement, l'équation suivante s'appuie sur l'EQ. 4 pour construire une matrice de covariance $N \times N$:

$$\widehat{\mathbf{R}}_{pp} = E[\mathbf{p}(t)\mathbf{p}^H(t)] = \frac{N}{\Delta T} \int_0^{\Delta T/N} \mathbf{p}(t)\mathbf{p}^H(t) dt. \quad \text{EQ. 5}$$

[0031] Au niveau des blocs 410 et 412, une fonction de transfert modélisée des signaux virtuels correspondant à chaque capteur virtuel respectif du réseau de capteurs virtuels et un facteur de correction temporel des signaux virtuels sont déterminés et utilisés pour calculer un poids virtuel du capteur virtuel respectif. Au niveau du bloc 414, le poids virtuel est alors appliqué à la matrice de covariance pour ajuster la matrice de covariance.

En outre, un vecteur d'orientation réel des signaux virtuels correspondant à chaque capteur virtuel respectif est également déterminé et également utilisé pour ajuster la matrice de covariance.

- [0032]** Au niveau du bloc 416, un spectre spatial 418 indiquant l'emplacement de la fuite est calculé sur la base de la matrice de covariance ajustée. Une technique de formation de faisceaux divulguée dans le présent document peut utiliser l'EQ. 5 pour déterminer un pic localisé du spectre spatial 418, où le pic localisé indique l'emplacement de la fuite. Plus particulièrement, le pic localisé peut être déterminé en réalisant les opérations précédentes pour construire le réseau de capteurs virtuels 322A-322H sur la base du capteur physique 122 puis en recherchant les pics qui indiquent l'emplacement. Par exemple, $\mathcal{R} = \{\hat{\mathbf{r}}_0 \dots \hat{\mathbf{r}}_K\}$ désigne l'ensemble qui contient l'emplacement de la grille où le balayage du spectre spatial est réalisé. Pour chaque emplacement, le vecteur d'orientation $a_1(\hat{\mathbf{r}}_j)$ peut être calculé et appliqué à la technique de formation de faisceaux de Capon en calculant le spectre spatial, où $\mathbf{P}_{Capon}^{OSA}(\hat{\mathbf{r}}_j) = \frac{1}{\mathbf{a}_1^H(\hat{\mathbf{r}}_j)\hat{\mathbf{R}}_{pp}^{-1}\mathbf{a}_1(\hat{\mathbf{r}}_j)}$. Enfin, l'emplacement de la source peut être déterminé comme étant l'argument qui maximise le spectre spatial, où $\mathbf{P}_{Capon}^{OSA}(\hat{\mathbf{r}}_j)$, exprimé par :

$$\hat{\mathbf{r}}_k = \arg \max_{\hat{\mathbf{r}}_j \in \mathcal{R}} \mathbf{P}_{Capon}^{OSA}(\hat{\mathbf{r}}_j) \quad \text{EQ. 6}$$

- où $(.)^H$ correspond à une opération hermitienne, où $\mathbf{a}_1(\hat{\mathbf{r}}_j)$ est modélisé avec les poids virtuels $\mathbf{w}_1(\hat{\mathbf{r}}_j) = \mathbf{A}(\mathbf{t}_1)[w_{1,1}(\hat{\mathbf{r}}_j) \dots w_{1,N}(\hat{\mathbf{r}}_j)]^T$ pour le champ libre correspondant au vecteur d'orientation des poids virtuels de la position des capteurs virtuels à $[\mathbf{m}_{1,1} \dots \mathbf{m}_{1,N}]^T$ en raison du capteur physique 122 \mathbf{m}_1 . $w_{1,n}(\hat{\mathbf{r}}_j)$ est la fonction de transfert qui modélise le délai entre la position $\hat{\mathbf{r}}_j$ et la position du capteur virtuel à $\mathbf{m}_{1,n}$, et où $\mathbf{A}(\mathbf{t}_1) = diag(e^{j\omega t_{1,1}}, \dots, e^{j\omega t_{1,N}})$ est le facteur de correction temporel avec $\mathbf{t}_1 = [t_{1,1}, \dots, t_{1,N}]$ étant le délai pour synchroniser les capteurs virtuels selon un cadre temporel commun, où ω est la fréquence angulaire du signal incident.

- [0033]** Les modes de réalisation divulgués ci-dessus ont été présentés à des fins illustratives et pour permettre au spécialiste du domaine de pratiquer la divulgation, mais la divulgation n'est pas destinée à être exhaustive ou limitée aux formes divulguées. De nombreuses modifications et variations peu importantes seront évidentes pour le spécialiste du domaine sans s'écartez de la portée et de l'esprit de la divulgation. La portée des revendications est destinée à couvrir largement les modes de réalisation divulgués et toute modification de ce

type. En outre, les clauses suivantes représentent des modes de réalisation supplémentaires de la divulgation et doivent être considérées comme étant dans la portée de la divulgation :

5 [0034] Clause 1, un procédé de détection de fuite en fond de puits, le procédé comprenant l'obtention de signaux physiques détectés par au moins un capteur physique se déplaçant le long d'un puits de forage ; la réalisation d'une opération de décomposition en valeurs singulières sur les signaux physiques d'un premier capteur physique de l'au moins un capteur physique pour obtenir une pluralité de signaux virtuels associés à un réseau de capteurs virtuels, chaque capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels étant situé à une distance virtuelle par rapport au premier capteur physique, la distance virtuelle correspondant à une distance physique ; la synchronisation des signaux virtuels du réseau de capteurs virtuels ; et le calcul d'un spectre spatial indiquant un emplacement d'une fuite sur la base des signaux virtuels synchronisés.

10 15 [0035] Clause 2, le procédé selon la clause 1, comprenant en outre l'utilisation d'une technique de formation de faisceaux pour déterminer un pic localisé du spectre spatial, dans lequel le pic localisé indique l'emplacement de la fuite.

20 [0036] Clause 3, le procédé selon la clause 1 ou 2, comprenant en outre la détermination d'une distance radiale approximative de la fuite par rapport au premier capteur physique, dans lequel l'emplacement de la fuite est exprimé par la distance radiale approximative.

25 [0037] Clause 4, le procédé selon l'une des clauses 1 à 3, dans lequel la distance radiale approximative comprend deux composantes le long de deux axes perpendiculaires qui forment un plan le long duquel le premier capteur physique est déplacé, et dans lequel la détermination de la distance radiale approximative comprend la détermination d'une distance le long d'une première composante (axe des x) et d'une distance le long d'une seconde composante (axe des y).

30 [0038] Clause 5, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 4, dans lequel la distance radiale comprend un troisième composant le long d'un axe (axe des z) normal par rapport au plan le long duquel le premier capteur physique est déplacé, et dans lequel la détermination de la distance radiale approximative comprend la détermination d'une distance le long du troisième composant.

35 [0039] Clause 6, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 5, comprenant en outre la détermination d'un vecteur d'orientation réel des signaux virtuels correspondant à un capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels ; et l'application du vecteur d'orientation réel à une ou plusieurs valeurs d'une matrice de covariance qui représente les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel.

[0040] Clause 7, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 6, comprenant en outre la détermination d'un facteur de correction temporel des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ; la détermination d'une fonction de transfert modélisée des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ; le calcul d'un poids virtuel du capteur virtuel par rapport au premier capteur physique sur la base du facteur de correction temporel et de la fonction de transfert modélisée ; et l'application du poids virtuel à une ou plusieurs valeurs de la matrice de covariance qui représentent les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel.

[0041] Clause 8, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 7, dans lequel l'obtention des signaux du premier capteur physique comprend la détermination de signaux à un emplacement d'origine $p_1(t)$ et d'un déplacement relatif du premier capteur physique en raison du mouvement du premier capteur physique.

[0042] Clause 9, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 8, dans lequel le signal du premier capteur physique à $p_1(t)$ est approximativement égal à $a_1(\mathbf{r}_0 + \Delta\mathbf{r}(t))s_o(t) + q(t)$, $0 \leq t \leq \Delta T$, dans lequel l'emplacement d'origine est situé à $(0, 0)$ le long de deux axes perpendiculaires (x, y) qui forment un plan le long duquel le premier capteur physique et la fuite sont déplacés, dans lequel $s_o(t)$ représente un signal source de la fuite située à un emplacement $\mathbf{r}_0 = (x_o, y_o)$, $\Delta\mathbf{r}(t)$ représente un déplacement relatif en raison du mouvement du premier capteur physique, $a_1(\mathbf{r}_0 + \Delta\mathbf{r}(t))$ est un vecteur d'orientation du signal vers le premier capteur physique, et dans lequel ΔT est un cadre temporel de fenêtre d'acquisition.

[0043] Clause 10, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 9, dans lequel le réseau de capteurs virtuels comprend un total de N capteurs virtuels, dans lequel les signaux virtuels associés à chaque capteur virtuel respectif sont approximativement $p_{1,n}(t) = p_1\left(t + \frac{\Delta T}{N}(n - 1)\right)$ avec $0 \leq t \leq \frac{\Delta T}{N}$, dans lequel $n \in [1, N]$ et désigne un nombre de capteurs virtuels dudit capteur virtuel respectif.

[0044] Clause 11, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 10, dans lequel la synchronisation des signaux virtuels du réseau de capteurs virtuels comprend la construction d'une matrice de covariance sur la base de la pluralité des signaux virtuels obtenus à partir de l'opération de décomposition en valeurs singulières.

[0045] Clause 12, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 11, dans lequel la distance virtuelle de chaque capteur respectif parmi N capteurs virtuels par rapport au premier capteur physique est $[\mathbf{m}_{1,1} \dots \mathbf{m}_{1,N}]$, dans lequel $\mathbf{m}_{1,n} = \mathbf{m}_1 + \nu \frac{(n-\varepsilon)\Delta T}{N}$.

[0046] Clause 13, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 12, dans lequel le premier capteur physique se déplace le long du puits de forage à une vitesse approximativement constante.

5 **[0047]** Clause 14, le procédé selon au moins l'une des clauses 1 à 13, dans lequel l'au moins un capteur physique est constitué du premier capteur physique.

10 **[0048]** Clause 15, un système de détection de fuite en fond de puits comprenant un détecteur de fuite comportant un capteur physique pouvant se déplacer le long d'un puits de forage et détecter des signaux physiques indiquant une fuite à proximité du capteur physique ; et un processeur connecté en communication au détecteur de fuite et permettant de réaliser une opération de décomposition en valeurs singulières sur les signaux physiques du capteur physique pour obtenir une pluralité de signaux virtuels associés à un réseau de capteurs virtuels, chaque capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels étant situé à une distance virtuelle par rapport au capteur physique, la distance virtuelle correspondant à une distance physique ; synchroniser les signaux virtuels du réseau de capteurs virtuels ; calculer un spectre spatial indiquant un emplacement d'une fuite sur la base des signaux virtuels synchronisés ; et utiliser une technique de formation de faisceaux pour déterminer un pic localisé du spectre spatial, dans lequel le pic localisé indique l'emplacement de la fuite.

15

[0049] Clause 16, le système de détection de fuite en fond de puits selon la clause 15, dans lequel le processeur permet en outre la détermination d'un vecteur d'orientation réel des signaux virtuels correspondant à un capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels ; et l'application du vecteur d'orientation réel à une ou plusieurs valeurs d'une matrice de covariance qui représente les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel.

20 **[0050]** Clause 17, le système de détection de fuite en fond de puits selon la clause 15 ou 16, dans lequel le processeur permet en outre la détermination d'un facteur de correction temporel des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ; la détermination d'une fonction de transfert modélisée des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ; le calcul d'un poids virtuel du capteur virtuel par rapport au capteur physique sur la base du facteur de correction temporel et de la fonction de transfert modélisée ; et l'application du poids virtuel à une ou plusieurs valeurs de la matrice de covariance qui représentent les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel.

25

[0051] Clause 18, le système de détection de fuite en fond de puits selon l'une quelconque des clauses 15 à 17, dans lequel le processeur est un composant du détecteur de fuite et est disposé à l'intérieur d'un tubage du détecteur de fuite.

[0052] Clause 19, le système de détection de fuite en fond de puits selon l'une quelconque des clauses 15 à 18, dans lequel le processeur est un composant d'un dispositif électronique de surface.

[0053] Clause 20, un support lisible par une machine non transitoire 5 comprenant des instructions y étant stockées, en vue de l'exécution par un processeur, qui lorsqu'il est exécuté par le processeur, amène le processeur à réaliser des opérations comprenant l'obtention de signaux physiques détectés par un capteur physique se déplaçant le long d'un puits de forage ; la réalisation d'une opération de décomposition en valeurs singulières sur les signaux physiques du capteur physique pour obtenir une pluralité de signaux virtuels associés à un réseau 10 de capteurs virtuels, chaque capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels étant situé à une distance virtuelle par rapport au capteur physique, la distance virtuelle correspondant à une distance physique ; la construction d'une matrice de covariance de la pluralité des signaux virtuels obtenus à partir de l'opération de décomposition en valeurs singulières ; l'ajustement des valeurs de la matrice de covariance pour synchroniser la pluralité des signaux virtuels ; le calcul 15 d'un spectre spatial indiquant un emplacement d'une fuite sur la base des signaux virtuels synchronisés ; et l'utilisation d'une technique de formation de faisceaux pour déterminer un pic localisé du spectre spatial, dans lequel le pic localisé indique l'emplacement de la fuite.

[0054] Clause 21, le support lisible par une machine non transitoire selon 20 la revendication 20, comprenant en outre des instructions y étant stockées, qui lorsqu'il est exécuté par le processeur, amène le processeur à réaliser des opérations comprenant la détermination d'un facteur de correction temporel des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ; la détermination d'une fonction de transfert modélisée des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ; le calcul d'un poids virtuel du capteur virtuel par rapport au capteur physique sur la base du facteur de correction temporel et de la fonction de transfert 25 modélisée ; la détermination d'un vecteur d'orientation réel des signaux virtuels correspondant à un capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels ; et l'application du vecteur d'orientation réel et du poids virtuel à une ou plusieurs valeurs de la matrice de covariance qui représentent les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel.

[0055] Sauf indication contraire, toute utilisation de toute forme des 30 termes « connecter », « venir en contact », « accoupler », « attacher » ou de tout autre terme décrivant une interaction entre les éléments de la divulgation précédente n'est pas destinée à limiter l'interaction à une interaction directe entre les éléments et peut également comprendre une interaction indirecte entre les éléments décrits. Telles qu'utilisées dans le présent document, les formes singulières « un », « une », « le » et « la » sont destinées à comprendre les formes 35 plurielles également, sauf si le contexte indique clairement le contraire. Sauf indication contraire,

tel qu'utilisé dans l'ensemble du présent document, « ou » ne nécessite pas une exclusivité mutuelle. Il sera entendu que les termes « comprendre » et/ou « comprenant », lorsqu'ils sont utilisés dans le présent mémoire et/ou les revendications, spécifient la présence de caractéristiques, étapes, opérations, éléments et/ou composants indiqués, mais n'empêchent pas 5 la présence ou l'addition d'un(e) ou plusieurs autres caractéristiques, étapes, opérations, éléments, composants, et/ou groupes de ceux-ci. De plus, les étapes et les composants décrits dans les modes de réalisation et sur les figures ci-dessus sont simplement illustratifs et n'impliquent pas qu'une étape ou un composant particulier quelconque soit une exigence d'un mode de réalisation revendiqué.

10 [0056] Il devrait être évident d'après ce qui précède que les modes de réalisation d'une invention ayant des avantages importants ont été fournis. Bien que les modes de réalisation soient représentés seulement sous quelques formes, les modes de réalisation ne sont pas limités mais sont susceptibles de subir divers changements et modifications sans s'éloigner de l'esprit de ceux-ci.

15

REVENDEICATIONS

1. Procédé de détection de fuite en fond de puits, comprenant :
 - le déploiement d'un détecteur de fuite (118) comportant au moins un capteur physique (122) dans un puits de forage (106) ;
 - l'obtention de signaux physiques détectés par le au moins un capteur physique (122) lorsque le détecteur de fuite se déplace le long du puits de forage (106) ;
 - la réalisation, au moyen d'un processeur (210), d'une opération de décomposition en valeurs singulières sur les signaux physiques d'un premier capteur physique de l'au moins un capteur physique pour obtenir une pluralité de signaux virtuels associés à un réseau de capteurs virtuels (322A-322H), chaque capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels étant situé à une distance virtuelle par rapport au premier capteur physique, la distance virtuelle correspondant à une distance physique ;
 - la détermination d'un facteur de correction temporel des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels ;
 - la détermination d'une fonction de transfert modélisée des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ;
 - le calcul d'un poids virtuel du capteur virtuel par rapport au premier capteur physique (122) sur la base du facteur de correction temporel et de la fonction de transfert modélisée ; et
 - l'application du poids virtuel à une ou plusieurs valeurs d'une matrice de covariance qui représentent les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ;
 - la synchronisation, au moyen du processeur, des signaux virtuels du réseau de capteurs virtuels ; et
 - le calcul, au moyen du processeur, d'un spectre spatial indiquant un emplacement d'une fuite sur la base des signaux virtuels synchronisés.
 2. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre l'utilisation d'une technique de formation de faisceaux pour déterminer un pic localisé du spectre spatial, dans lequel le pic localisé indique l'emplacement de la fuite.
 3. Procédé selon la revendication 2, comprenant en outre la détermination d'une distance radiale approximative de la fuite par rapport au premier capteur physique (122), dans lequel l'emplacement de la fuite est exprimé par la distance radiale approximative.

4. Procédé selon la revendication 3, dans lequel la distance radiale approximative comprend deux composantes le long de deux axes perpendiculaires qui forment un plan le long duquel le premier capteur physique (122) est déplacé, et dans lequel la détermination de la distance radiale approximative comprend la détermination d'une distance le long d'une première composante (axe des x) et d'une distance le long d'une seconde composante (axe des y).

5 10 15 5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel la distance radiale comprend une troisième composante le long d'un axe (axe des z) normal par rapport au plan le long duquel le premier capteur physique (122) est déplacé, et dans lequel la détermination de la distance radiale approximative comprend la détermination d'une distance le long de la troisième composante.

15 20 25 6. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre :
la détermination d'un vecteur d'orientation réel des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel, et
l'application du vecteur d'orientation réel conjointement avec le facteur de correction temporel à une ou plusieurs valeurs de la matrice de covariance.

20 25 30 35 7. Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'obtention des signaux du premier capteur physique (122) comprend la détermination de signaux à un emplacement d'origine $p_1(t)$ et d'un déplacement relatif du premier capteur physique en raison du mouvement du premier capteur physique.

25 30 35 8. Procédé selon la revendication 7, dans lequel le signal du premier capteur physique (122) à $p_1(t)$ est approximativement égal à $a_1(r_0 + \Delta r(t))s_o(t) + q(t)$, $0 \leq t \leq \Delta T$, dans lequel l'emplacement d'origine est situé à $(0, 0)$ le long de deux axes perpendiculaires (x, y) qui forment un plan le long duquel le premier capteur physique et la fuite sont déplacés, dans lequel $q(t)$ est le bruit blanc gaussien superposé qui capture les effets du bruit thermique et environnemental, $s_o(t)$ représente un signal source de la fuite située à un emplacement $r_0 = (x_o, y_o)$, $\Delta r(t)$ représente un déplacement relatif en raison du mouvement du premier capteur physique, $a_1(r_0 + \Delta r(t))$ est un vecteur d'orientation du signal vers le premier capteur physique, et dans lequel ΔT est un cadre temporel de fenêtre d'acquisition.

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel le réseau de capteurs virtuels comprend un total de N capteurs virtuels, dans lequel les signaux virtuels associés à chaque capteur virtuel respectif sont approximativement $p_{1,n}(t) = p_1 \left(t + \frac{\Delta T}{N} (n - 1) \right)$ avec $0 \leq t \leq \frac{\Delta T}{N}$, et dans lequel $n \in [1, N]$ et désigne un nombre de capteurs virtuels dudit capteur virtuel respectif, ΔT est un cadre temporel de fenêtre d'acquisition, et dans lequel la synchronisation des signaux virtuels du réseau de capteurs virtuels (322A-322H) comprend la construction d'une matrice de covariance sur la base de la pluralité des signaux virtuels obtenus à partir de l'opération de décomposition en valeurs singulières.

10 10. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la distance virtuelle de chaque capteur respectif parmi N capteurs virtuels par rapport au premier capteur physique est $[\mathbf{m}_{1,1} \ \cdots \ \mathbf{m}_{1,N}]$, dans lequel $\mathbf{m}_{1,n} = \mathbf{m}_1 + \nu \frac{(n-\varepsilon)\Delta T}{N}$ et dans lequel ΔT est un cadre temporel de fenêtre d'acquisition, $n \in [1, N]$ et désigne un nombre de capteurs virtuels dudit capteur virtuel respectif et $\varepsilon \in (0, 1]$ et est le pourcentage du décalage par rapport à l'origine.

15 11. Système de détection de fuite en fond de puits comprenant :
un détecteur de fuite (118) comportant un capteur physique (122) pouvant se déplacer le long d'un puits de forage (106) et détecter des signaux physiques indiquant une fuite à proximité du capteur physique ; et

20 un processeur (210) accouplé en communication au détecteur de fuite et permettant :

la réalisation d'une opération de décomposition en valeurs singulières sur les signaux physiques du capteur physique pour obtenir une pluralité de signaux virtuels associés à un réseau de capteurs virtuels (322A-322H), chaque capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels étant situé à une distance virtuelle par rapport au capteur physique, la distance virtuelle correspondant à une distance physique ;

la détermination d'un facteur de correction temporel des signaux virtuels correspondant à un capteur virtuel d'un réseau de capteurs virtuels ;

30 la détermination d'une fonction de transfert modélisée des signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ;

le calcul d'un poids virtuel du capteur virtuel par rapport au premier capteur physique sur la base du facteur de correction temporel et de la fonction de transfert modélisée ; et

l'application du poids virtuel à une ou plusieurs valeurs de la matrice de covariance qui représentent les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ;

la synchronisation des signaux virtuels du réseau de capteurs virtuels ;
 le calcul d'un spectre spatial indiquant un emplacement d'une fuite sur la base
 des signaux virtuels synchronisés ; et
 l'utilisation d'une technique de formation de faisceaux pour déterminer un pic
 5 localisé du spectre spatial, où le pic localisé indique l'emplacement de la fuite.

12. Système de détection de fuite en fond de puits selon la revendication 11,
 dans lequel le processeur (210) est configuré en outre pour :

la détermination d'un vecteur d'orientation réel des signaux virtuels
 10 correspondant au capteur virtuel ;
 l'application du vecteur d'orientation réel à une ou plusieurs valeurs de la
 matrice de covariance.

13. Système de détection de fuite en fond de puits selon la revendication 12,
 15 dans lequel le processeur (210) est un composant du détecteur de fuite (118) et est disposé à
 l'intérieur d'un tubage du détecteur de fuite, et dans lequel le capteur physique (122) se déplace le
 long du puits de forage (106) à une vitesse approximativement constante.

14. Support lisible par une machine non transitoire comprenant des
 20 instructions y étant stockées, en vue de l'exécution par un processeur (210), qui lorsqu'il est
 exécuté par le processeur, amène le processeur à réaliser des opérations comprenant :

l'obtention de signaux physiques détectés par un capteur physique (122) se
 déplaçant le long d'un puits de forage (106) ;

la réalisation d'une opération de décomposition en valeurs singulières sur les
 25 signaux physiques du capteur physique pour obtenir une pluralité de signaux virtuels associés à
 un réseau de capteurs virtuels (322A-322H), chaque capteur virtuel du réseau de capteurs virtuels
 étant situé à une distance virtuelle par rapport au capteur physique, la distance virtuelle
 correspondant à une distance physique ;

la construction d'une matrice de covariance de la pluralité des signaux virtuels
 30 obtenus à partir de l'opération de décomposition en valeurs singulières ;

la détermination d'un facteur de correction temporel des signaux virtuels
 correspondant à un capteur virtuel d'un réseau de capteurs virtuels ;

la détermination d'une fonction de transfert modélisée des signaux virtuels
 correspondant au capteur virtuel ;

le calcul d'un poids virtuel du capteur virtuel par rapport au premier capteur physique sur la base du facteur de correction temporel et de la fonction de transfert modélisée ; et

l'application du poids virtuel à une ou plusieurs valeurs de la matrice de covariance qui représentent les signaux virtuels correspondant au capteur virtuel ;

5 l'ajustement des valeurs de la matrice de covariance pour synchroniser la pluralité des signaux virtuels ;

le calcul d'un spectre spatial indiquant un emplacement d'une fuite sur la base des signaux virtuels synchronisés ; et

10 l'utilisation d'une technique de formation de faisceaux pour déterminer un pic localisé du spectre spatial,

dans lequel le pic localisé indique l'emplacement de la fuite.

110

FIG. 1A

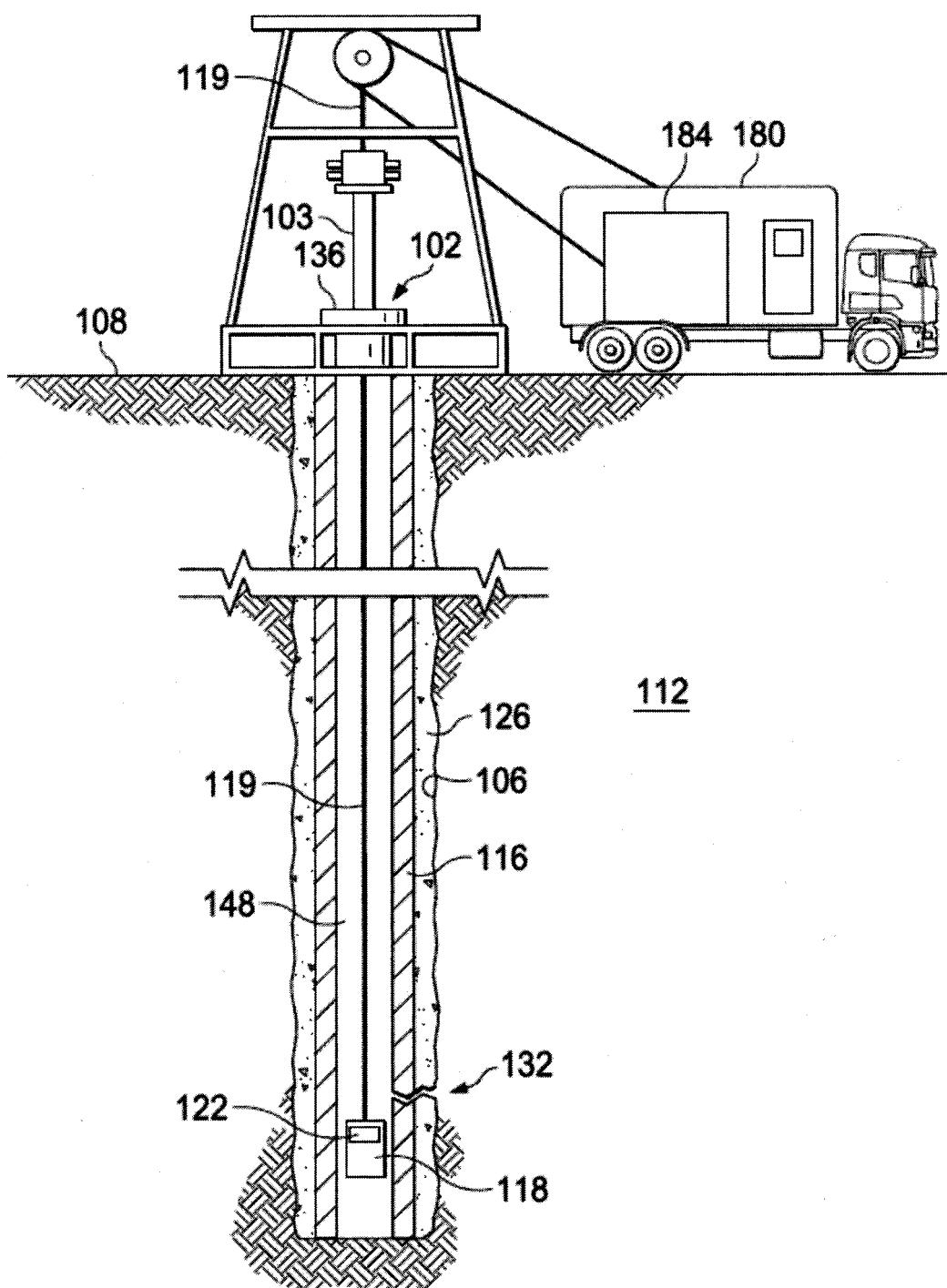
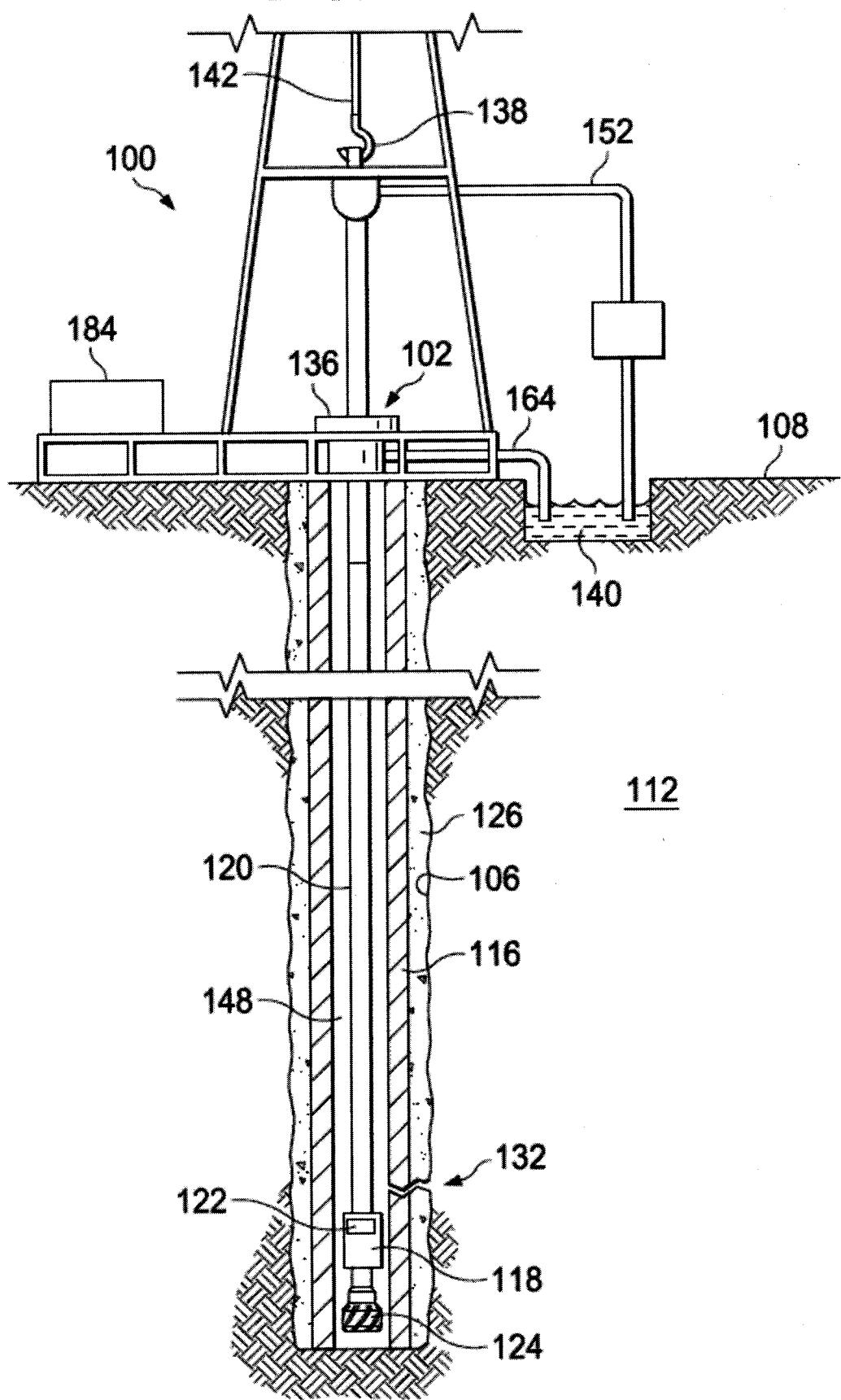


FIG. 1B



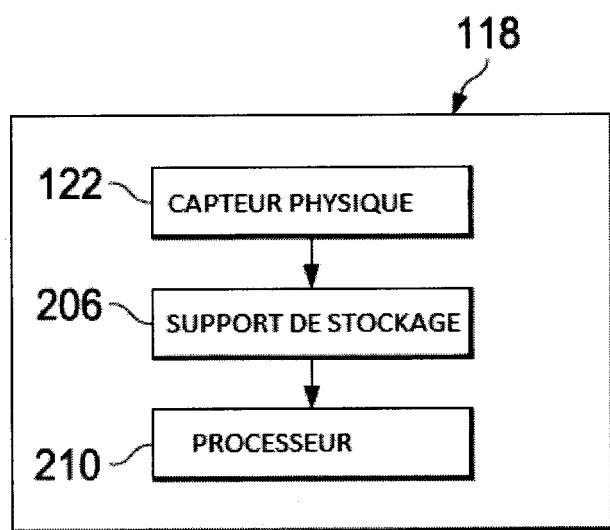
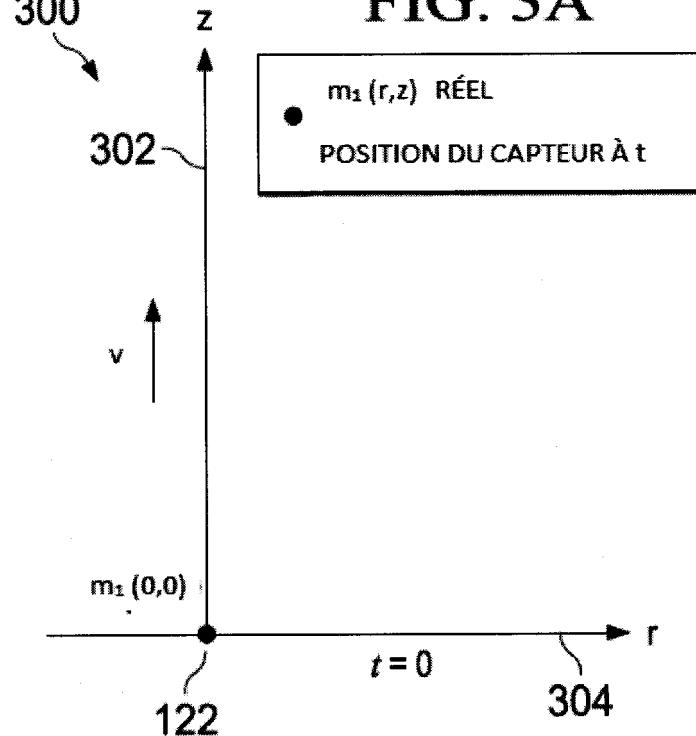
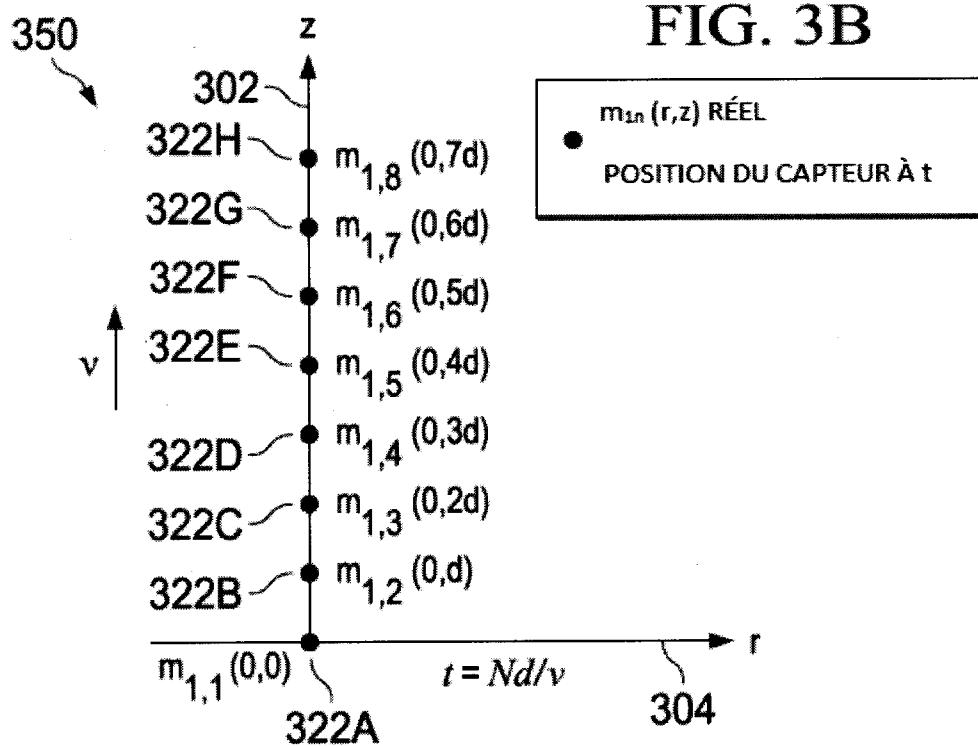


FIG. 2

FIG. 3A**FIG. 3B**

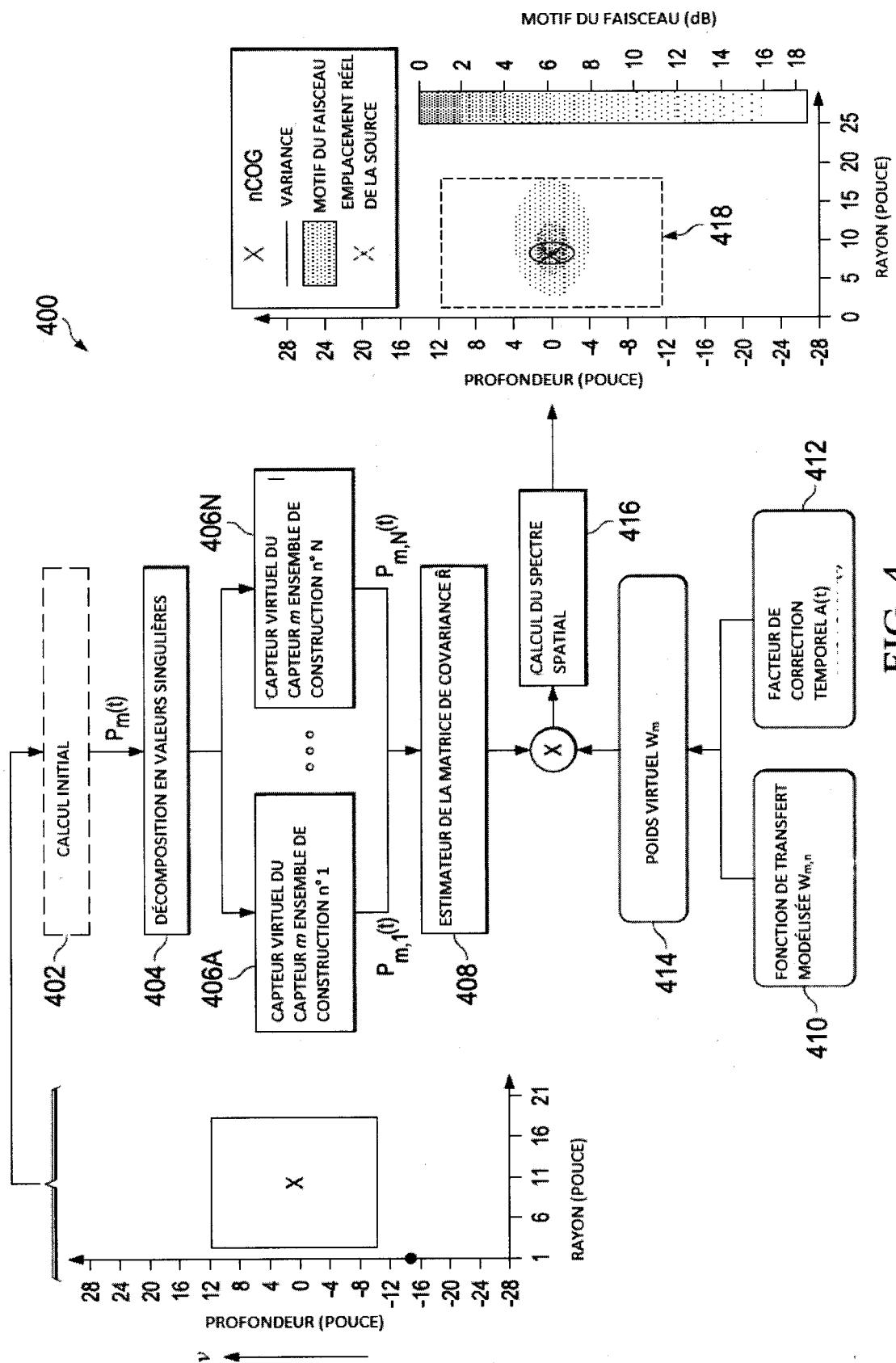


FIG. 4

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 (nouveauté) 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

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

□ Le demandeur a maintenu les revendications.

[x] 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.

[x] 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**

US 4114721 A (GLENN JR EDWIN E) 19 septembre 1978 (1978-09-19)

US 2011188346 A1 (HULL JOHN [CA]) 04 aout 2011 (2011-08-04)

US 2014025319 A1 (FARHADIROUSHAN M ET AL., [GB]) 23 janvier 2014 (2014-01-23)

US 2012060615 A1 (FARHADIROUSHAN M ET AL., [GB]) 15 mars 2012 (2012-03-15)

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

NEANT

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

NEANT