

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

①① N° de publication :

3 037 993

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

②① N° d'enregistrement national :

16 54723

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : E 21 B 47/10 (2016.01)

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②② Date de dépôt : 26.05.16.

③③ Priorité : 26.06.15 US 62184995; 11.05.16 IB  
WOUS2016031772.

④③ Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 30.12.16 Bulletin 16/52.

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.*

⑥③ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

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

⑦② Inventeur(s) : ANG YI YANG, NGUYEN NAM et LIE  
JONI.

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

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

⑤④ FORMATION DE FAISCEAUX EN CONTINU EN DEPLACEMENT: PROCEDE PERMETTANT DE REDUIRE LES  
EFFETS DE REPLIEMENTS SPATIAUX DANS LA DETECTION DE FUITE.

⑤⑦ Tools, systems, and methods may be configured for or  
include detecting one or more underground acoustic  
sources and localizing them in depth and radial distance  
from a wellbore using an array of at least three acoustic sen-  
sors disposed in the wellbore in conjunction with array-si-  
gnal-processing that accounts for movement of the acoustic  
sensors and spatial aliasing by using adaptive time de-  
pendent modelled steering vector weights.

FR 3 037 993 - A1



## **FORMATION DE FAISCEAUX EN CONTINU EN DÉPLACEMENT : PROCÉDÉ PERMETTANT DE RÉDUIRE LES EFFETS DE REPLIEMENTS SPATIAUX DANS LA DÉTECTION DE FUITE**

### **CONTEXTE**

5

**[0001]** La présente demande concerne la détection de fuite dans un puits de forage.

**[0002]** Au cours du cycle de vie d'un puits de gaz et de pétrole, il est souhaitable de surveiller et de maintenir l'intégrité du puits. En particulier, l'intégrité des barrières du puits (telles que les tuyaux de production, le tubage du puits et la gaine en ciment enveloppante) est importante pour assurer une opération sans danger du puits et éviter les événements d'éclatement ou de fuite d'hydrocarbures dans l'environnement. Les fuites au niveau des barrières du puits peuvent, en principe, être détectées en surveillant les flux de fluide sous terre (*par ex.*, de gaz ou de pétrole) dans et autour un puits de forage. La surveillance des flux de fond de puits autour des puits de forage, tels que de l'eau injectée, peut également être importante lors de la caractérisation du réservoir.

### **BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS**

**[0003]** Les figures suivantes sont présentées afin d'illustrer certains aspects des modes de réalisation, et ne doivent pas être considérées comme des modes de réalisation exclusifs. L'objet de l'invention divulgué peut subir de considérables modifications, altérations, combinaisons et équivalents, dans la forme et dans la fonction, comme il sera évident aux spécialistes du domaine qui bénéficient de cette divulgation.

**[0004]** La figure 1 illustre un exemple d'un réseau de capteurs acoustique déployé à l'intérieur du puits de forage.

**[0005]** La figure 2 illustre, à un niveau conceptuel élevé, la façon dont une source acoustique peut être localisée en deux dimensions.

**[0006]** La figure 3 illustre un organigramme global d'un procédé de formation de faisceaux en déplacement qui utilise des pondérations de vecteur orientable modélisé dépendant d'une durée adaptative.

**[0007]** La figure 4 est un graphique illustratif montrant un exemple  $\Delta T_n$  pour les différentes vitesses de réseau.

**[0008]** La figure 5 illustre un exemple d'un système de diagraphe par câble dans un puits. Le système comprend un outil de sonde suspendu à un câble dans un puits de forage tubé.

**[0009]** La figure 6 illustre un système pour la détection et la localisation des sources acoustiques souterraines implémenté dans un système de forage pour des opérations de diagraphe MWD.

**[0010]** Les figures 7A-7C comparent la précision (A) d'un réseau de capteurs stationnaire avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe, (B) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe et (C) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés dépendants d'une durée adaptative dans lequel la fréquence de source (7 kHz) est inférieure à la fréquence du repliement spatial.

**[0011]** Les figures 8A-8C comparent la précision (A) d'un réseau de capteurs stationnaire avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe, (B) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe et (C) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés dépendants d'une durée adaptative dans lequel la fréquence de source (25 kHz) est supérieure à la fréquence du repliement spatial.

**[0012]** Les figures 9A-9C comparent la précision (A) d'un réseau de capteurs stationnaire avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe, (B) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe et (C) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés dépendants d'une durée adaptative dans lequel la fréquence de source (47 kHz) est inférieure à la fréquence du repliement spatial.

## DESCRIPTION DÉTAILLÉE

**[0013]** La présente demande concerne la détection de fuite dans un puits de forage.

**[0014]** Les flux de fluide souterrains émettent généralement des signaux acoustiques qui peuvent être mesurés, par ex., avec des câbles à fibre déposées le long du puits de forage ou avec des capteurs de points acoustiques tels que les capteurs ou hydrophones d'un réseau de fibres de Bragg (FBG). Les procédés existants sont, cependant, très limités dans leur exactitude et la précision avec laquelle un flux de fluide détecté peut être localisé. En outre, les procédés existants assument ou nécessitent généralement que l'outil soit relativement stationnaire lors de l'enregistrement des signaux acoustiques provenant des flux de fluide. Cependant, en pratique, l'outil se déplace préférentiellement à travers le puits de forage généralement à une vitesse fixe d'environ 20 pieds par minute à environ 30 pieds par minute.

**[0015]** Les exemples de modes de réalisation décrits ici comprennent des outils, des systèmes et des procédés permettant de détecter une ou plusieurs sources acoustiques souterraines et de les localiser selon la distance de profondeur et la distance radiale à partir d'un puits de forage utilisant un réseau d'au moins 3 capteurs acoustiques (également appelé ici « un réseau de capteurs ») placé dans le puits de forage en association avec un traitement de signal du réseau qui tient compte du mouvement des capteurs acoustiques et des effets de repliement spatial en utilisant des pondérations de vecteurs adaptatifs orientables modélisés dépendants de la durée. La détection et la localisation de la source acoustique conformément à la présente invention peuvent être utilisées, en particulier, pour identifier des flux de fluide souterrains (*par ex.*, provenant de fuite dans les barrières du puits) desquels émanent les signaux acoustiques.

**[0016]** Tel qu'il est utilisé ici, le terme « profondeur » de la présente invention décrit généralement une coordonnée le long d'une direction d'un puits de forage, indépendamment du fait que le trou de forage se prolonge verticalement dans la formation ou qu'il est incliné par rapport à la direction verticale. Tel qu'il est utilisé ici, le terme « distance radiale » décrit une direction perpendiculaire à et s'éloignant de l'axe longitudinal du puits de forage.

**[0017]** Tel qu'il est utilisé ici, le terme « traitement du signal de réseau » décrit généralement les techniques permettant d'estimer ou de calculer les paramètres d'une ou de plusieurs sources de signaux (tels que les emplacements de source et les formes d'onde émise) en fusionnant les données collectées par un réseau de capteurs ayant des relations géométriques connues, soit sensiblement soit simultanément ou,

plus généralement, ayant des relations temporelles connues entre les différents signaux de capteurs. Tel qu'il est utilisé ici, le terme « sensiblement simultanément » par rapport aux intervalles de temps indique que les intervalles de temps pendant lesquels les signaux sont collectés se chevauchent de façon importante (*par ex.*, par au moins 90 %, de préférence au moins 99 %) entre les différents capteurs.

5       **[0018]**       Les techniques de traitement de signal de réseau comprennent, sans limitation, divers procédés de filtrage spatial, tels que la formation de faisceaux classique, la formation de faisceaux de Capon, la classification multiple des signaux (MUSIC) et divers procédés paramétriques, aussi bien que l'estimation du temps de retard. Le traitement de signal de réseau dépend généralement d'un modèle avancé de propagation des ondes à partir de là ou des sources vers les capteurs afin de résoudre le problème inverse (*par ex.*, localisation de la source). Dans des contextes d'applications classiques, tel qu'un radar et sonar, ce modèle avancé est généralement simple étant donné que la propagation de l'onde se fait dans un milieu uniforme (homogène ou isotrope) (*par ex.*, dans l'air ou dans l'eau) et on peut assumer que la source est éloignée des capteurs. Cependant, lorsque des flux de fluide dans ou autour d'un puits de forage sont mesurés, les suppositions de milieu uniforme et d'éloignement ne tiennent plus. Par conséquent, dans divers modes de réalisation, le modèle avancé est ajusté pour tenir compte de la configuration et de la condition du puits de forage et de la formation environnante (qui collectivement comprennent divers milieux de propagation et des limites entre les deux) et leur effet sur le champ d'onde (*par ex.*, réfraction d'onde, réflexion et résonance), aussi bien que pour faciliter le traitement des signaux de champ proche (*c.-à-d.*, des signaux provenant d'une source dont la distance par rapport aux capteurs n'est pas significativement (*par ex.*, ordre de grandeur) plus grande que l'étendue spatiale du réseau de capteurs).

20       **[0019]**       L'implémentation du traitement de signal de réseau implique, conformément à certains modes de réalisation, la fusion des signaux reçus par les capteurs individuels du réseau pour la pluralité des emplacements de sources putatifs à l'intérieur d'une région à deux dimensions prédéfinie (qui, *par ex.*, recouvre une certaine longueur dans la direction de la profondeur et se prolonge sur une certaine distance radiale par rapport au trou de forage) afin de calculer une carte en 2D d'un niveau d'énergie, d'une amplitude de la source acoustique, ou d'autres paramètres de signal fusionné comme une fonction de la profondeur et de la distance radiale. Le ou

les emplacements réels de la source peuvent être déterminés à partir de cette carte en identifiant le maximum local (ou les multiples maxima locaux) du niveau d'énergie de la source acoustique ou d'un autre paramètre. La grandeur du maximum local peut être utilisée pour déduire si oui ou non la source acoustique identifiée correspond vraiment à un flux souterrain. Par ex., dans certains modes de réalisation, les signaux acoustiques sont acquis dans des conditions de multiples flux et de non-flux afin d'établir un seuil de détection statistique pour les flux pour une utilisation dans le test d'hypothèse binaire ou un test statistique semblable.

**[0020]** La figure 1 illustre un exemple d'un réseau de capteurs acoustiques amovible déployé à l'intérieur d'un puits de forage, conformément aux divers modes de réalisation. Tel qu'il est démontré, les capteurs 100 peuvent être placés de façon linéaire le long de l'axe longitudinal 102 du puits de forage (dont la coordonnée radiale est zéro). Ils peuvent être uniformément espacés (tel qu'illustré) ou il peut y avoir un espacement varié entre les capteurs adjacents. L'environnement du capteur comprend généralement de multiples barrières physiques au flux du fluide, tels que les tuyaux de production 104 à travers lesquels le gaz ou le pétrole peut être pompé vers le haut et hors du puits, un ou éventuellement de multiples tubages de puits nichés 106 et une gaine en ciment 108 remplissant l'espace entre le ou les tubages 106 et la formation 110 entourant le puits de forage. En outre, le puits de forage peut être divisé en de multiples sections verticales, *par ex.*, par des joints de formation 112 entre les tubages 106 qui peuvent séparer, *par ex.*, une partie inférieure perforée du tubage par laquelle entrent les hydrocarbures provenant d'une partie supérieure (non-perforée) servant de conduit vers le haut. Des scénarios de flux non-prévus qui peuvent se produire dans cette configuration peuvent comprendre, sans limitation, des flux à travers le tubage 106 ou les tuyaux 104 en raison des fissures ou des trous dans ceux-ci (identifiés par des flèches 120), les flux à travers un joint de formation 112 entre des sections verticales adjacentes du puits de forage en raison d'une étanchéité insuffisante (identifiés par les flèches 122) et des flux à l'intérieur de la formation 110, la gaine de ciment 108 ou une autre couche qui est plus ou moins parallèle aux limites de la couche (identifiées par les flèches 124). Lorsque les flux s'écoulent à travers des trajets restreints, des signaux acoustiques peuvent être générés en raison des chutes de pression qui accompagnent ces flux. Les signaux acoustiques se propagent

généralement dans toutes les directions à travers la formation et/ou le trou de forage, pouvant être détectés au niveau des divers emplacements de capteur.

**[0021]** Les capteurs acoustiques 100 appropriés pour une utilisation dans les modes de réalisation décrits ici comprennent, par ex. et sans limitation, des hydrophones (piézoélectrique), des capteurs FBG ou des segments d'un câble de fibre optique distribué. Dans divers modes de réalisation, les capteurs acoustiques sont omnidirectionnels, *c.-à-d.*, incapables de différencier par eux-mêmes les différentes directions entrantes du signal. En exploitant les relations spatio-temporelles entre les signaux provenant de la même source au niveau de multiples capteurs, cependant, les informations concernant la direction et/ou l'emplacement de la source du signal peuvent être obtenues. Par ex., en utilisant au moins trois capteurs dans un agencement linéaire le long de l'axe du puits de forage, comme le démontre la FIG. 1, il est possible, au moins dans certaines conditions, de déterminer la profondeur et la distance radiale de la source (comme il sera décrit plus en détail ci-dessous). Afin de localiser également la source dans la direction azimutale, la configuration du réseau de capteurs peut être modifiée, *par ex.*, en plaçant différents capteurs à différentes positions radiales en les plaçant en deux ou en trois dimensions, en recouvrant partiellement les capteurs afin de limiter leur détection à certaines fenêtres azimutales (des fenêtres différents pour différents capteurs) tout en pivotant les capteurs partiellement recouverts afin de couvrir l'intégralité de la région azimutale, ou en utilisant des capteurs orientables (*c.-à-d.*, des capteurs qui procurent de façon inhérente des informations sur la direction). Une configuration linéaire illustrée dans la FIG. 1 peut être une conséquence des confinements spatiaux imposés par les tuyaux 104 dans lesquels sont montés les capteurs.

**[0022]** La figure 2 illustre, à un niveau conceptuel élevé 200, la façon dont une source acoustique 202 (*par ex.*, un flux de fluide) peut être localisé en deux dimensions (*par ex.*, une distance radiale  $x$  et une profondeur  $y$ ) basé sur les signaux provenant simultanément de multiples capteurs 204,206,208 (illustrés comme trois capteurs) à des emplacements différents R1, R2 et R3, respectivement, à condition que le milieu soit uniforme de sorte que le signal voyage de la source vers les capteurs le long de lignes droites (sans subir, *par ex.*, de réfraction ou de réflexion) et à une vitesse connue et constante, du son  $v$ . Dans ce cas, le temps de trajet  $t$  du signal

provenant de la source vers un capteur est simplement le rapport de la distance  $d$  210,212,214 entre la source 202 et les capteurs 204,206,208, respectivement, vers le  $v$ . Comme il sera facilement compris par un homme du métier, le  $t$  absolu ne peut pas être mesuré par des procédés de détection de flux passifs décrits ici étant donné que  
 5 le signal acoustique ne possède pas un point de départ connu dans le temps (étant donné que le flux commence généralement longtemps avant les mesures et, dans tous les cas, à un moment inconnu). Cependant, le retard de temps  $\Delta t_{ij} = t_i - t_j$  entre la réception d'une certaine caractéristique du signal (*par ex.*, un pic dans la forme d'onde temporelle) au niveau d'un premier capteur  $i$  et la réception de la même  
 10 caractéristique au niveau d'un second capteur  $j$  (*c.-à-d.*, le décalage de phase relatif) peut, en principe, être déterminé avec les équations 1 et 2

$$t_i = \frac{d_i}{v} = \frac{\sqrt{(x_s - x_{ri})^2 + (y_s - y_{ri})^2}}{v} \quad \text{ÉQ. 1}$$

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j = \frac{\sqrt{(x_s - x_{ri})^2 + (y_s - y_{ri})^2} - \sqrt{(x_s - x_{rj})^2 + (y_s - y_{rj})^2}}{v} \quad \text{ÉQ 2}$$

**[0023]** Avec des emplacements connus de capteurs (R1 à  $(x_{r1}, y_{r1})$ , R2 à  $(x_{r2}, y_{r2})$  et R3 à  $(x_{r3}, y_{r3})$  et un  $v$  connu, ce temps de retard donne une équation non-linéaire contenant deux inconnus, notamment les coordonnées  $(x_s, y_s)$  de la  
 20 source  $s$ . Un second temps de retard mesuré entre l'un des capteurs  $i$  ou  $j$  et un troisième capteur  $k$  donne une deuxième équation non-linéaire indépendante. À partir de ces deux équations, l'emplacement de la source en 2D peut être calculé tout simplement d'une façon connue des hommes du métier. Si le  $v$  est inconnu et/ou change lorsque le signal se propage à travers différents milieux, un réseau avec un  
 25 grand nombre de capteurs (*par ex.*, 4 capteurs ou plus) peut être utilisé pour donner suffisamment d'informations permettant de localiser la source.



**[0024]** Dans les scénarios les plus complexes généralement retrouvés dans des applications de détection du flux, telles qu'elles sont envisagées ici, le traitement de signal prend généralement une forme plus complexe. Dans divers modes de réalisation, un procédé de traitement de signal d'un réseau (tel que le filtrage spatial) peut être utilisé pour fusionner les divers signaux de capteur simultanément acquis et localiser la source acoustique.

**[0025]** Dans certains cas, la technique de traitement du signal de réseau peut comprendre au moins l'un d'un filtrage spatial, d'une estimation d'un temps de retard ou d'une méthode son-énergie.

**[0026]** La figure 3 est un aperçu d'un exemple de technique de traitement de signal de réseau 300 qui utilise des pondérations de vecteurs orientables modélisés dépendants d'une durée adaptative 316, selon certains modes de réalisation de la présente demande. Par ex., une source acoustique éloignée à bande étroite («  $s(t)$  »)) peut être utilisée, comme il est décrit ici, pour illustrer les principes qui sous-tendent les procédés de filtrage spatial de la présente divulgation.

**[0027]** Mathématiquement, le signal 302 capté à l'aide du réseau de capteurs statiques placé le long de l'axe des  $y$  (c.à.d., le long de l'axe longitudinal 102 du puits de forage de la figure 1) peut éventuellement être normalisé en appliquant une opération de normalisation 304 pour produire à signal reçu  $p_m(t)$  306 au niveau du  $m$ ème capteur avec des signaux provenant de la  $K$  source de fuite,  $s_1(t), \dots, s_K(t)$ . Étant donné qu'il y a des  $M$  capteurs dans le réseau avec un espacement inter-élément  $d$ , le vecteur de signal reçu 306 de chaque capteur peut être exprimé sous la forme de l'ÉQ 3.

$$p_m(t) = \sum_{k=1}^K a_m(r_{s_k}) s_k(t) + q_m(t), \quad \text{ÉQ 3.}$$

dans laquelle  $a_m(r_{s_k})$  est la fonction de transfert de la  $k$ ème source se propageant vers le  $m$ ème capteur,  $r_{s_k} = (x_{s_k}, y_{s_k})$  est un vecteur identifiant la position de la  $k$ ème source incidente,  $s_k(t)$  représente la grandeur de la  $k$ ème source

incidente et  $q_m(t)$  représente le bruit blanc gaussien additif qui capte les effets du bruit thermique et environnemental.

**[0028]** Le signal  $p_m(t)$  306 provenant de tous les capteurs peut également être représenté sous forme de vecteur  $p(t)$  comme il est défini dans l'ÉQ.

5 4.

$$p(t) = [p_1(t) \quad \dots \quad p_m(t) \quad \dots \quad p_M(t)]^T = As(t) + q(t), \quad \text{ÉQ}$$

4.

10 dans lequel

$$s(t) = [s_1(t) \quad \dots \quad s_m(t) \quad \dots \quad s_K(t)]^T,$$

$$A = [a(r_{s_1}) \quad \dots \quad a(r_{s_k})],$$

$$q(t) = [q_1(t) \quad \dots \quad q_M(t)]^T,$$

$$a(r_{s_k}) = [a_1(r_{s_k}) \quad \dots \quad a_m(r_{s_k}) \quad \dots \quad a_M(r_{s_k})]^T, \text{ et}$$

15

$(.)^T$  identifie l'opération de transposition.

**[0029]** Avec l'ÉQ 4 la matrice de covariance théorique  $R$  du modèle de réseau de capteur statique a la forme suivante.

20

$$R = AE\{s(t)s^H(t)\}A^H + \sigma_q I, \quad \text{ÉQ 5}$$

dans laquelle  $E\{\cdot\}$  identifie l'opération d'attente,  $(\cdot)^H$  identifie l'opération de transposition Hermitienne, et  $\sigma_q$  représente la puissance assumée du bruit  $\mathbf{I}$  étant la matrice d'identité.

**[0030]** Dans des applications pratiques, la matrice de covariance théorique  $R$  peut être remplacée par un échantillon de matrice de covariance  $\hat{R}$  calculé à l'aide de l'ÉQ. 6.

$$\hat{R} = \frac{1}{\Delta T} \int_{t=0}^{t=\Delta T} \mathbf{p}(t) \mathbf{p}^H(t) dt. \quad \text{ÉQ. 6.}$$

10 où  $\Delta T$  représente la durée du signal reçu capté 306 pour le réseau.

**[0031]** Classiquement, la localisation du réseau de capteur statique peut être réalisée en construisant le spectre spatial  $\beta(r_j)$  et en recherchant les pics. Les pics sont utilisés comme probabilité de l'emplacement des sources. En laissant  
15  $\mathcal{R} = \{\mathbf{r}_1 \cdots \mathbf{r}_L\}$  identifier l'ensemble qui contient l'emplacement de grille dans lequel le balayage spatial est réalisé, alors, pour chaque emplacement, les pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants à durée fixe  $\mathbf{a}(\mathbf{r}_j)$  où  $\mathbf{r}_j \in \mathcal{R}$  est d'abord calculé, avant l'estimation du spectre spatial standard de Capon  $\beta(r_j)$  par l'ÉQ. 7.

20

$$\beta(r_j) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(r_j) \hat{R}^{-1} \mathbf{a}(r_j)}. \quad \text{ÉQ. 7}$$

**[0032]** Idéalement, si le réseau est stationnaire, le maximum local se produira  $\mathbf{r}_j = \mathbf{r}_{s_k}$  lorsque le poids du vecteur orientable  $\mathbf{a}(\mathbf{r}_j)$  correspond bien avec  
25 la matrice de covariance  $\hat{R}$ .

**[0033]** Cependant, lorsque le réseau de capteurs se déplace à une vitesse constante  $\mathbf{v}$ , le signal reçu 306 dans la durée de  $\Delta T$  produira une matrice de covariance  $\hat{\mathbf{R}}$  qui ne correspond plus au poids du vecteur orientable  $\mathbf{a}(\mathbf{r}_j)$  du modèle stationnaire dans l'Éq. 5. Spécifiquement, le déplacement relatif causé par le mouvement au temps  $t$  ( $0 \leq t \leq \Delta T$ ) peut être modélisé sous forme de  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{v}\Delta T$ . Dans ce cas, le signal reçu 306 provenant des  $K$  sources peut être exprimé sous forme de :

$$\mathbf{p}(t, \Delta \mathbf{r}) = \sum_{k=1}^K \mathbf{a}(\mathbf{r}_{s_k} + \Delta \mathbf{r}) s_k(t) + \mathbf{q}(t) = \mathbf{A}(\Delta \mathbf{r}) \mathbf{s}(t) + \mathbf{q}(t)$$

Éq. 8

dans laquelle  $\mathbf{A}(\Delta \mathbf{r}) = [\mathbf{a}(\mathbf{r}_{s_1} + \Delta \mathbf{r}) \quad \dots \quad \mathbf{a}(\mathbf{r}_{s_K} + \Delta \mathbf{r})]$ .

**[0034]** En tenant compte du réseau de capteurs en déplacement, la présente demande a pour but de localiser la position de la source de la fuite  $\mathbf{r}_{s_k} = (x_{s_k}, y_{s_k})$  où  $k = \{1, \dots, K\}$  en suivant l'analyse du signal reçu 306.

**[0035]** Lorsque la matrice de covariance théorique provenant du vecteur de signal reçu dans l'Éq. 8 est identifiée comme  $\mathbf{R}(\Delta \mathbf{r})$ , l'Éq. 9 est dérivée.

$$\mathbf{R}(\Delta \mathbf{r}) = \mathbf{E}\{\mathbf{p}(t, \Delta \mathbf{r}) \mathbf{p}^H(t, \Delta \mathbf{r})\} = \mathbf{A}(\Delta \mathbf{r}) \mathbf{E}\{\mathbf{s}(t) \mathbf{s}^H(t)\} \mathbf{A}^H(\Delta \mathbf{r}) + \sigma_q \mathbf{I}.$$

Éq. 9

**[0036]** Lorsque  $t$ ,  $\mathbf{v}$  ou la fréquence du signal augmente (longueur d'onde plus courte), la différence entre  $\mathbf{A}(\Delta \mathbf{r})$  et  $\mathbf{A}$  augmente également. Et donc, l'application directe de l'Éq. 7 utilisant la matrice de covariance générée dans la durée  $\Delta T$  avec l'Éq. 9 entraînera un mésappariement au niveau de ses vecteurs orientables. Une approche ad hoc permettant de résoudre ce mésappariement consiste à écourter

la durée d'acquisition  $\Delta T$  de l'ÉQ. 6 jusqu'à ce que la condition stationnaire soit préservée. En pratique, ceci peut être obtenu en tronquant  $\Delta T$  et en utilisant un vecteur orientable modélisé indépendant de la durée et à pondération fixe, qui est une opération de construction du spectre spatial de Capon 318, décrit plus loin.

- 5       **[0037]**       Cependant, afin de résoudre de façon efficace le mésappariement, la solution est donnée en divisant le signal reçu 306 enregistré à l'intérieur de la fenêtre d'acquisition  $\Delta T$  en de multiples trames. En règle générale, lorsqu'une opération de décomposition de trame 308 est appliquée au signal reçu 306, le signal reçu 306 se décompose en trames  $N$  décomposées égales plus courtes 310<sub>0</sub>...310<sub>N-1</sub>
- 10   dans lesquelles la condition stationnaire est préservée. Alors, chacune des trames décomposées 310<sub>0</sub>...310<sub>N-1</sub> représente un réseau virtuel. Pour le jeu de  $N$  trames décomposées 310<sub>0</sub>...310<sub>N-1</sub>, les matrices de covariance théoriques correspondantes  $R(n\Delta r)$  peuvent être représentées par l'ÉQ. 10.

15        $\{R(0) \quad R(\Delta r) \quad \dots \quad R(n\Delta r) \quad \dots \quad R((N-1)\Delta r)\}.$        ÉQ. 10

- [0038]**       L'application d'un estimateur d'échantillon de matrice de covariance 312<sub>0</sub>...312<sub>N-1</sub> (ÉQ. 11) à chacune des trames décomposées 310<sub>0</sub>...310<sub>N-1</sub> convertit chacune des trames décomposées 310<sub>0</sub>...310<sub>N-1</sub> en un échantillon de matrice
- 20   de covariance 314<sub>0</sub>...314<sub>N-1</sub> ( $\{\hat{R}(0) \quad \dots \quad \hat{R}(n\Delta r) \quad \dots \quad \hat{R}((N-1)\Delta r)\}$ ).

$$\hat{R}(n\Delta r) = \frac{N}{\Delta T} \int_{t=n\Delta T/N}^{t=(n+1)\Delta T/N} p(t, n\Delta r) p^H(t, n\Delta r). \quad \text{ÉQ. 11}$$

**[0039]** En appliquant l'opération de construction du spectre spatial de Capon 318<sub>0</sub>...318<sub>N-1</sub> (ÉQ. 12) les pondérations des vecteurs orientables modélisés adaptatifs dépendants de la durée 316<sub>0</sub>...316<sub>N-1</sub> à un quelconque échantillon unique de matrice de covariance  $\hat{\mathbf{R}}(n\Delta\mathbf{r})$  314<sub>0</sub>...314<sub>N-1</sub>, la réponse du spectre spatial de Capon (  $\beta^{(n)}(\mathbf{r}_j)$  ) 320<sub>0</sub>...320<sub>N-1</sub> pour chacune des trames est produite, dans lesquelles on peut rechercher les signaux de pic correspondant à l'emplacement source.

$$\beta^{(n)}(\mathbf{r}_j) = \frac{b_n}{\mathbf{a}^H(\mathbf{r}_j + n\Delta\mathbf{r}) \hat{\mathbf{R}}^{-1}(n\Delta\mathbf{r}) \mathbf{a}(\mathbf{r}_j + n\Delta\mathbf{r})} \quad \text{ÉQ. 12}$$

10

dans laquelle  $b_n$  est le facteur de pondération pour chaque  $n$ ième trame et  $\mathbf{a}(\mathbf{r}_j + n\Delta\mathbf{r})$  représente les pondérations des vecteurs orientables modélisés adaptatifs dépendantes de la durée 316<sub>0</sub>...316<sub>N-1</sub>.

**[0040]** Même si une quelconque réponse du spectre spatial de Capon individuel  $\beta^{(n)}(\mathbf{r}_j)$  320<sub>0</sub>...320<sub>N-1</sub> peut être utilisée pour rechercher l'emplacement source  $\mathbf{r}_{s_k} = (x_{s_k}, y_{s_k})$ , l'opération de construction du spectre spatial de Capon 318<sub>0</sub>...318<sub>N-1</sub> peut être sujet à un repliement spatial qui produit des pics de lobes latéraux dans la réponse du spectre spatial de Capon 320<sub>0</sub>...320<sub>N-1</sub>, qui pourraient être identifiés, de façon erronée, comme des emplacements source. Afin de réduire l'intensité des lobes latéraux, une réponse moyenne pondérée du spectre spatial de Capon  $\beta_{moving}(\mathbf{r}_j)$  324 est calculé en réalisant une opération de normalisation et d'addition 322 (ÉQ. 13) sur la réponse du spectre spatial de Capon 320<sub>0</sub>...320<sub>N-1</sub>. Étant donné que les lobes latéraux ne sont pas localisés de façon constante dans chacune des réponses du spectre spatial de Capon 320<sub>0</sub>...320<sub>N-1</sub>, l'opération de normalisation et d'addition 322 entraîne une réduction de l'intensité des pics de lobes latéraux et une augmentation de l'intensité de l'emplacement source.

25

$$\beta_{moving}(r_j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \beta^{(n)}(r_j) \quad \text{ÉQ. 13}$$

**[0041]** Dans certains cas, les signaux acoustiques provenant des sources acoustiques peuvent avoir une fréquence plus élevée qu'une fréquence de repliement spatial utilisée dans la technique de traitement du signal de réseau. Par ailleurs, les signaux acoustiques peuvent avoir une fréquence inférieure à une fréquence de repliement spatial utilisée dans la technique de traitement du signal de réseau. Par ex., afin de prévenir un repliement spatial, l'espacement inter-capteurs peut être  $d \leq \lambda/2$ . Où  $\lambda$  représente la longueur d'onde du signal incident. Cependant, étant donné que le réseau est conçu avec un espace inter-capteurs fixe,  $d$ , il peut souffrir d'un effet de repliement spatial lorsque la longueur d'onde du signal incident est  $\lambda/2 \leq d$ .

**[0042]** Dans certains cas, l'ÉQ. 11 peut être utilisé pour lier la conception de  $\Delta T_n = \Delta T/N$ , où : lorsque le réseau se déplace seulement le long de l'axe des  $z$  à une vitesse,  $v = v_z$ , alors, on peut approcher  $\Delta T_n$  comme étant stationnaire si la différence entre la distance radiale de  $n\Delta T$  and  $(n-1)\Delta T$  est liée à l'intérieur de 1 %. La contrainte de liaison à 1 % peut être exprimée mathématiquement sous forme de l'ÉQ. 14.

$$\Delta T_n \leq \frac{0.01|r_j|}{v_z} \quad \text{ÉQ. 14}$$

**[0043]** La figure 4 est un graphique illustratif montrant un exemple  $\Delta T_n$  pour différentes vitesses de réseau avec une liaison de 1 %.

**[0044]** Les procédés décrits ici peuvent être implémentés par un jeu d'instructions qui amène un processeur à réaliser la technique de traitement de signal de réseau décrite ici qui comprend un vecteur orientable modélisé adaptatif dépendant de la durée permettant de déterminer une profondeur et une distance radiale à partir d'un puits de forage de la source acoustique.

**[0045]** Le processeur peut faire partie d'un matériel informatique utilisé pour implémenter les divers blocs, modules, éléments, composants, procédés et algorithmes illustratifs décrits ici. Le processeur peut être configuré pour exécuter une ou plusieurs séquences d'instructions, de position de programmation ou de code stocké sur un support non-transitoire lisible par ordinateur. Le processeur peut être, par ex., un microprocesseur polyvalent, un microcontrôleur, un processeur de signal numérique, un circuit intégré spécifique à une application, un circuit intégré prédiffusé programmable, un dispositif logique programmable, une commande, une machine d'état, une porte logique, des composants matériels discrets, un réseau neural artificiel, ou une quelconque entité de ce type appropriée qui peut réaliser des calculs ou d'autres manipulations de données. Dans certains modes de réalisation, un matériel informatique peut comprendre des éléments tels que, par ex., une mémoire (*par ex.*, une mémoire RAM, une mémoire flash, une mémoire ROM, une mémoire PROM, une mémoire EPROM, des registres, des disques durs, des disques amovibles, des cédéroms, des DVD, ou tout autre dispositif ou support de stockage approprié semblable.

**[0046]** Les séquences exécutables décrites ici peuvent être implémentées avec une ou plusieurs séquences de code contenues dans une mémoire. Dans certains modes de réalisation, un tel code peut être lu dans la mémoire à partir d'un autre support lisible par machine. L'exécution des séquences d'instructions contenues dans la mémoire peut amener le processeur à exécuter les étapes du procédé décrites ici. Un ou plusieurs des processeurs dans un ensemble multiprocesseurs peuvent être utilisés pour exécuter les séquences d'instructions dans la mémoire. En outre, un circuit câblé peut être utilisé à la place de ou en association avec des instructions logicielles pour implémenter divers modes de réalisation décrits ici. Ainsi, les présents modes de réalisation ne sont pas limités à une combinaison spécifique de matériel et/ou de logiciel.

**[0047]** Dans ce contexte, un support lisible par ordinateur correspond à un quelconque support qui transmet directement ou indirectement des instructions à un processeur pour l'exécution. Un support lisible par ordinateur peut prendre une forme quelconque comprenant, par exemple, un support non-volatile, un support volatile et un support de transmission. Le support volatile peut comprendre, par exemple, une mémoire dynamique. Un support de transmission peut comprendre, par ex., des



câbles coaxiaux, des fils, la fibre optique et des fils qui forment un bus. Les formes courantes de supports lisibles par ordinateur peuvent comprendre, par exemple, des disquettes, des disques flexibles, des disques durs, des bandes magnétiques, autres qu'un support de type magnétique, des cédéroms, des DVD, et d'autres supports optiques de ce type, des cartes perforées, des bandes de papiers et des supports physiques de ce type avec des trous, des RAM, ROM, PROM, EPROM et EPROM flash.

**[0048]** La détection et la localisation des sources acoustiques souterraines (et ainsi, les flux de fluide souterrains) conformément à la présente invention peuvent être implémentées à la fois dans des opérations de diagraphie par câble et de mesure lors du forage (MWD). La figure 5 illustre un exemple d'un système de diagraphie par câble dans un puits. Le système comprend un outil de sonde 500 suspendu à un câble 502 dans un puits de forage tubé 504.

**[0049]** Dans divers modes de réalisation, l'outil 500 est utilisé à l'intérieur du tubage de production 506 à travers lequel les hydrocarbures sont pompés hors du puits de forage 504. L'outil 500 comprend une pluralité (au moins trois) capteurs acoustiques 508 (tels que, *par ex.*, hydrophones), *par ex.*, placés dans un réseau linéaire 510 le long d'un axe longitudinal 511 de l'outil 500 et, par conséquent, du puits de forage 504. En outre, l'outil peut comprendre un circuit approprié de commande et de traitement 512 qui peut, à son tour, être en communication (*par ex.*, à travers une connexion câblée ou un système de télémetrie) avec un système de traitement de données en surface 514. Le module de traitement de données qui procure la fonction informatique pour le traitement et la fusion des signaux acoustiques reçus par les capteurs individuels 508 et la détection et la localisation des flux basés sur ceux-ci peut être implémenté par l'un du circuit de commande et de traitement 512 ou le système de traitement des données 514, ou les deux en association. Par ex., dans certains modes de réalisation, le circuit de commande et de traitement 512 prétraite les signaux du capteur individuel (*par ex.*, par conditionnement du signal, filtrage et/ou suppression du bruit) et les transmet au système de traitement des données 514 en surface, où la carte de signal fusionné est calculée, et les sources acoustiques induites par le flux sont détectées et localisées en se basant sur celle-ci. Chacun du circuit de commande et de traitement 512 et du système de traitement des données 514 en surface peut généralement être implémenté dans un matériel, ou une combinaison de celui-ci, comme, par ex., un

ordinateur polyvalent ou spécialisé programmé de façon appropriée comprenant, *par ex.*, un processeur et une mémoire associée (tel que le démontre la FIG. 6). Dans divers modes de réalisation, les signaux acoustiques traités sont évalués en association à des mesures provenant d'autres capteurs (*par ex.*, des mesures de la température et la pression à la surface du puits (pour évaluer les conditions de flux et l'intégrité globale du puits.

**[0050]** Des configurations de capteur alternatives peuvent être utilisées pour soutenir la détection de la source acoustique dans une opération de diagraphe par câble. Par *ex.*, dans certains modes de réalisation, un câble de fibre optique distribué est utilisé à la place de capteurs de points acoustiques. Le câble de fibre optique peut être installé de façon permanente dans le puits de forage, *par ex.*, fixé derrière le tubage ou intégré dans l'anneau cimenté. Un canal, correspondant à un segment du câble de fibre optique, peut être optiquement scanné afin de détecter les signaux acoustiques environnants. Dans cette configuration, différents canaux à différentes profondeurs correspondent à différents capteurs acoustiques.

**[0051]** En utilisant un outil de diagraphe par câble 500, le réseau de capteurs acoustiques peut rechercher, à une quelconque profondeur de forage, un espace en 2D prédéfini, *par ex.*, la longueur de l'ouverture du réseau dans la direction de la profondeur et quelques mètres dans la formation dans la direction radiale. Cette recherche peut être répétée lorsque le réseau se déplace à une autre profondeur de forage. Ainsi, en un passage du câble de diagraphe, une région recouvrant toute la longueur du puits peut être analysée pour identifier des sources acoustiques induites par le flux. Dans certains modes de réalisation, le réseau de capteurs acoustiques fonctionne à une vitesse de forage rapide (*par ex.*, une vitesse allant jusqu'à 60 pieds par minute) afin de détecter des flux initialement avec une résolution spatiale grossière. Une fois qu'un ou plusieurs flux ont été détectés à certaines profondeurs, des régions de ces profondeurs peuvent être réexaminées à des vitesses d'examen plus faible, ou en mode stationnaire, afin de localiser le ou les flux avec une résolution spatiale plus fine. Dans des modes de réalisation dans lesquels un signal acoustique est émis le long d'un trajet prolongé (à l'opposé de l'émission à partir d'un point de source) le trajet de flux intégral peut être cartographié dans un espace en 2D de profondeur et de distance radiale.

**[0052]** En se rapportant maintenant à la FIG. 6 on peut voir qu'un système pour la détection et la localisation des sources acoustiques souterraines peut également être implémenté dans un système de forage pour des opérations de diagrapie MWD. Ceci peut être utile, *par ex.*, pour détecter des flux dans le but de caractériser la formation et les réservoirs d'hydrocarbures et d'orienter ou d'ajuster le forage en fonction de ceux-ci.

**[0053]** Tel qu'il est illustré, le système de forage comprend une plate-forme de forage 600 située au niveau de la surface du puits 604 et, soutenu par la plate-forme de forage 600, un train de tiges 606 pour forer un puits de forage 608 à travers les formations souterraines 610. Le train de tiges 606 comprend une tige de forage 612 et, généralement situé à l'extrémité inférieure de la tige de forage 612, un module de fond de puits (BHA) 614. Le BHA 614 peut comprendre le trépan de forage 616 et, placé au-dessus de celui-ci, une ou plusieurs masses-tiges 618, 620 qui peuvent contenir un certain nombre d'outils et d'instruments différents adaptés pour prendre des mesures au cours du procédé de forage. Conformément aux divers modes de réalisation, ces outils peuvent comprendre un réseau de capteurs acoustiques 624 (*par ex.*, comprenant trois ou plusieurs capteurs placés de façon linéaire) et le circuit de commande ou de traitement associé 626, et peut être en communication avec un système de traitement des données en surface 628. Ensemble, le réseau de capteurs acoustiques 624 et le circuit de commande et de traitement 626 et/ou le système de traitement des données 628 procurent une fonction pour implémenter les procédés décrits ci-dessus.

**[0054]** La présente divulgation comprend les modes de réalisation A-C.

**[0055]** Le mode de réalisation A est un procédé qui comprend le déplacement d'un réseau de capteurs comprenant au moins trois capteurs le long d'un puits de forage ; la mesure, sensiblement en simultané, des signaux acoustiques provenant d'une source acoustique avec chacun de l'au moins trois capteurs ; et le traitement des signaux acoustiques en association avec une technique de traitement de signal de réseau qui utilise des pondérations de vecteurs orientables modélisés adaptatifs dépendants de la durée afin d'identifier un emplacement du signal acoustique par une profondeur et une distance radiale à partir du puits de forage.

**[0056]** Le mode de réalisation B est un système qui comprend un réseau de capteurs qui peut être déplacé le long d'un puits de forage et comprenant au moins

trois capteurs acoustiques pour la mesure, sensiblement en simultané, des signaux acoustiques provenant d'une source acoustique et qui sont reçus au niveau de celui-ci ; un support non transitoire lisible par ordinateur codé avec des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées, exécutent les opérations : la mesure, sensiblement en simultané, des signaux acoustiques provenant d'une source acoustique avec chacun de l'au moins trois capteurs dans un réseau de capteurs se déplaçant le long d'un puits de forage ; et le traitement des signaux acoustiques en association avec l'utilisation d'une technique de traitement de signal de réseau qui comprend un vecteur orientable adaptatif modélisé dépendant de la durée permettant de déterminer une profondeur et une distance radiale à partir du puits de forage de la source acoustique.

**[0057]** Le mode de réalisation C est un support non transitoire lisible par ordinateur codé par des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées, réalisent les opérations comprenant : la mesure, sensiblement en simultané, des signaux acoustiques provenant d'une source acoustique avec chacun de l'au moins trois capteurs dans un réseau de capteurs se déplaçant le long d'un puits de forage ; et le traitement des signaux acoustiques en association avec l'utilisation d'une technique de traitement de signal de réseau qui comprend un vecteur orientable adaptatif modélisé dépendant de la durée permettant de déterminer une profondeur et une distance radiale à partir du puits de forage de la source acoustique.

**[0058]** Éventuellement, le mode de réalisation A, B ou C peut comprendre également un ou plusieurs des éléments suivants : Élément 1 : dans lequel les capteurs acoustiques forment un réseau linéaire placé le long d'un axe longitudinal du puits de forage. Élément 2 : dans lequel la technique de traitement du signal de réseau comprend au moins l'un d'un filtrage spatial, d'une estimation d'un temps de retard, et d'une méthode son-énergie ; Élément 3 : dans lequel les capteurs acoustiques comprennent l'un parmi : un hydrophone omnidirectionnel, un capteur de réseau de fibre de Bragg ou un câble de fibre optique, et une quelconque combinaison de ceux-ci ; Élément 4 : le procédé ou les opérations comprenant également le calcul d'une position azimutale de la source acoustique ; Élément 5 dans lequel, les signaux acoustiques ont une fréquence supérieure à une fréquence de repliement spatial utilisée dans la technique de traitement du signal de réseau ; Élément 6 : dans lequel, les signaux acoustiques ont une fréquence inférieure à une fréquence de repliement spatial utilisée dans la technique de traitement du signal de réseau ; Élément 7 : dans

lequel une condition stationnaire du réseau de capteurs est préservée en satisfaisant  $\Delta T_n \leq \frac{0.01|r_j|}{v_z}$ , où  $\Delta T_n$  est une durée du signal acoustique,  $r_j$  est un emplacement du premier capteur de l'au moins trois capteurs, et  $v_z$  est une vitesse du premier capteur se déplaçant le long du puits de forage ;

Élément 8 : Élément 7 et dans lequel la

technique de traitement du signal de réseau comprend : l'application d'une opération de troncature de données aux signaux acoustiques pour produire des trames ;

l'application d'un estimateur d'un échantillon de matrice de covariance aux trames pour produire un échantillon de matrice de covariance ; l'application d'une opération

de construction du spectre spatial de Capon utilisant les pondérations des vecteurs

orientables modélisés indépendants de la durée et à pondération fixe à l'échantillon de

la matrice de covariance pour produire une réponse du spectre spatial de Capon ; et

l'identification de l'emplacement du signal acoustique en se basant sur la réponse du

spectre spatiale de Capon ; et Élément 9 : dans lequel la technique de traitement du

signal de réseau comprend : L'application d'une opération de décomposition de trame

aux signaux acoustiques pour produire des trames décomposées ; l'application d'un

estimateur de l'échantillon de la matrice de covariance aux trames décomposées pour

produire un échantillon de matrice de covariance ; l'application de l'opération de

construction du spectre spatial de Capon utilisant les pondérations des vecteurs

orientables adaptatifs modélisés dépendants de la durée à l'échantillon de la matrice

de covariance pour produire une réponse du spectre spatial de Capon; l'application

d'une opération de normalisation et d'addition à la réponse du spectre spatial de

Capon pour produire une réponse moyenne pondérée du spectre spatial de Capon et

l'identification de l'emplacement du signal acoustique en se basant sur la réponse

moyenne pondérée du spectre spatial de Capon. Des exemples de combinaisons

comprennent, sans limitation : deux ou plusieurs des Éléments 1-4 en association ; un

ou plusieurs des Éléments 1-4 en association à l'Élément 5 ou l'Élément 6 ; un ou

plusieurs des Éléments 1-4 en association à l'Élément 7 (et éventuellement l'Élément

8) ou l'Élément 9 ; l'Élément 5 ou l'Élément 6 en association avec l'Élément 7 (et

éventuellement l'Élément 8) ou l'Élément 9 ; et des combinaisons de ceux-ci.

#### [0059]

Sauf en cas d'indication contraire, tous les chiffres exprimant des quantités d'ingrédients, des propriétés telles que le poids moléculaire, les conditions de réaction, etc., utilisés dans la présente demande et les revendications ci-jointes doivent être considérés comme étant modifiables dans tous les cas par le terme «

environ ». Par conséquent, sauf en cas d'indication contraire, les paramètres numériques décrits dans la demande suivante et les revendications ci-jointes sont des approximations qui peuvent varier en fonction des propriétés souhaitées qui sont recherchées par les modes de réalisation de la présente divulgation. Tout au moins, et non pas comme tentative de limiter l'application de la doctrine des équivalents à la portée des revendications, chaque paramètre numérique doit au moins être interprété à la lumière des points décimaux significatifs et en appliquant les règles ordinaires d'arrondis.

**[0060]** Un ou plusieurs modes de réalisation illustratifs incorporant les modes de réalisation divulgués ici sont présentés ici. Certaines caractéristiques de l'implémentation physique ne sont pas décrites dans cette demande dans un souci de clarté. Il doit être compris que dans le développement d'un mode de réalisation physique incorporant les modes de réalisation de la présente divulgation, de nombreuses décisions spécifiques à une implémentation doivent être prises afin d'atteindre les objectifs du développeur, tels que la conformité avec des contraintes apparentées au système, au domaine commercial, au gouvernement et à d'autres contraintes, qui varient selon les implémentations et de temps en temps. Alors que les efforts d'un développeur peuvent être chronophages, de tels efforts seraient, néanmoins, une tâche de routine pour un homme de métier qui bénéficie de la présente divulgation.

**[0061]** Bien que les compositions et les procédés soient décrits ici en termes de « comprenant » divers composants ou étapes, les compositions et procédés peuvent aussi « être constitués essentiellement de » ou « être constitués de » divers appareils ou étapes.

**[0062]** Pour faciliter une meilleure compréhension des modes de réalisation de la présente divulgation, les exemples suivants de modes de réalisation préférés ou représentatifs sont donnés. En aucun cas, les exemples suivants ne doivent être interprétés comme limitant, ou définissant, la portée de la divulgation.

## EXEMPLES

**[0063]** Les procédés, les systèmes et les outils décrits ici augmentent la capacité du formeur de faisceau à détecter et à localiser un signal ayant une fréquence

beaucoup plus élevée que sa fréquence de repliement spatial limitée par la géométrie du réseau physique. Les résultats provenant des simulations utilisant ce procédé illustrant l'amélioration sont donnés dans les figures 7A-7C, 8A-8C et 9A-9C.

**[0064]** Les figures 7A-7C comparent la précision (A) d'un réseau de capteurs stationnaire avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe (procédé classique), (B) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe (procédé classique), et (C) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés dépendants d'une durée adaptative (procédé de la présente demande) dans lequel la fréquence de source (7 kHz) est inférieure à la fréquence du repliement spatial.

**[0065]** La figure 7B en comparaison à la figure 1A illustre le fait que déplacer le réseau tout en calculant avec un formeur de faisceau à vecteur fixe orientable modélisé indépendant de la durée brouille les données. La figure 7C illustre le fait que les procédés, les outils et les systèmes de la présente divulgation qui associent un réseau en déplacement et un formeur de faisceau à vecteur de pondération adaptatif orientable dépendant du temps produit une sortie pour la fréquence de la source acoustique commensurable dans sa précision avec les conditions de la figure 7A. Étant donné qu'en pratique le réseau de capteurs serait en déplacement, cet exemple illustre la précision et l'applicabilité des exemples des procédés, des outils et des systèmes décrits ici.

**[0066]** Les figures 8A-8C comparent la précision (A) d'un réseau de capteurs stationnaire avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe, (B) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe et (C) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés dépendants d'une durée adaptative dans lequel la fréquence de source (25 kHz) est supérieure à la fréquence du repliement spatial.

**[0067]** Semblable à l'exemple illustré dans les figures 7A-7C, l'association d'un réseau en déplacement et un formeur de faisceau à vecteur de pondération adaptatif orientable dépendant du temps produit une sortie pour la fréquence de la source acoustique commensurable dans sa précision avec les conditions de la figure 8A. Cependant, dans cet exemple, la sortie du formeur de faisceau illustrée dans la

figure 8B n'est plus capable de localiser la source acoustique. Cet exemple illustre le fait que les exemples de procédés, d'outils et de systèmes décrits ici sont capables d'améliorer à la fois la précision et de réduire les effets de repliement spatial dans la détection des fuites.

5           **[0068]**     Les figures 9A-9C comparent la précision (A) d'un réseau de capteurs stationnaire avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe, (B) d'un réseau de capteurs amovible avec des pondérations de vecteurs orientables modélisés indépendants d'une durée fixe et (C)  
10           modélisés dépendants d'une durée adaptative dans lequel la fréquence de source (47 kHz) est inférieure à la fréquence du repliement spatial.

**[0069]**     Dans la figure 9A, la sortie du formeur de faisceau résultante contient beaucoup plus d'ambiguïté à cause de beaucoup plus de repliements en comparaison à la figure 8A, qu'on peut également voir dans une comparaison des  
15           figures 8B et 9B. Cependant, dans les conditions de la figure 9C, la sortie du formeur de faisceau illustrée démontre que l'effet de repliement spatial est réduit et le signal acoustique peut être facilement localisé.

**[0070]**     Par conséquent, la présente invention est bien adaptée pour atteindre les finalités et obtenir les avantages mentionnés ici aussi bien que ceux qui  
20           sont inhérents à la présente description. Les modes de réalisation particulier divulgués ci-dessus sont de nature illustrative seulement, et les enseignements de la présente divulgation peuvent être modifiés et pratiqués de façons différentes mais équivalentes qui seront évidentes un spécialiste du domaine qui bénéficie de ces enseignements. De plus, aucune limitation n'est prévue aux détails de construction ou de conception  
25           décrits ici, autres que ceux décrits dans les revendications ci-dessous. Il est donc évident que les modes de réalisation illustratifs donnés divulgués ci-dessus peuvent être altérés, combinés ou modifiés et toutes les variations de ce type sont considérées comme étant dans la portée et l'esprit de la présente divulgation. La divulgation, de façon illustrative appropriée, ici peut être pratiquée, de façon adéquate, en absence de  
30           tout élément qui n'est pas spécifiquement divulgué ici et/ou tout élément optionnel décrit ici. Bien que les compositions et les procédés soient décrits ici en termes de « comprenant », « 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 chiffres et les intervalles divulgués ci-dessus peuvent varier d'une certaine quantité. Lorsqu'un intervalle numérique avec une limite inférieure et une limite supérieure est indiqué, tout chiffre 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 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 le plus large de valeurs. En outre, les termes dans les revendications ont leur signification claire et ordinaire, sauf en cas d'indication explicite et claire autre définie par le demandeur. En outre, les articles indéfinis « un » ou « une », tels qu'ils sont utilisés dans les revendications, sont définis ici pour signifier un ou plusieurs de l'élément qu'ils introduisent.

## REVENDICATIONS

L'invention revendiquée est un :

1. Procédé comprenant :

le déplacement d'un réseau de capteurs comprenant au moins trois capteurs le  
5 long d'un puits de forage ;

la mesure sensiblement simultanément de signaux provenant d'une source  
acoustique avec chacun de l'au moins trois capteurs ; et

le traitement des signaux acoustiques en association utilisant une technique de  
traitement de signal de réseau qui utilise des pondérations de vecteur adaptatif  
10 orientable modélisé dépendant de la durée pour identifier un emplacement d'un signal  
acoustique par une profondeur et une distance radiale à partir d'un puits de forage.

2. Procédé de la revendication 1, dans lequel les capteurs acoustiques  
forment un réseau linéaire le long d'un axe longitudinal du puits de forage.

3. Procédé de la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel la  
15 technique de traitement du signal de réseau comprend au moins l'un choisi dans le  
groupe composé d'un filtrage spatial, d'une estimation d'un temps de retard et d'une  
méthode son-énergie.

4. Procédé de la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel les  
capteurs acoustiques comprennent l'un choisi dans le groupe composé : d'un  
20 hydrophone omnidirectionnel, d'un capteur de réseau de fibre de Bragg ou d'un câble  
de fibre optique, et d'une quelconque combinaison de ceux-ci ;

5. Procédé de la revendication 1 ou la revendication 2, comprenant  
également le calcul d'une position azimutale de la source acoustique.

6. Procédé de la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel les  
25 signaux acoustiques ont une fréquence supérieure à une fréquence de repliement  
spatial utilisé dans la technique de traitement du signal de réseau.

7. Procédé de la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel les  
signaux acoustiques ont une fréquence inférieure à une fréquence de repliement  
spatial utilisé dans la technique de traitement du signal de réseau.

8. Procédé de la revendication 1 ou 2, dans lequel une condition stationnaire  
30 du réseau de capteurs est préservée en satisfaisant  $\Delta T_n \leq \frac{0.01|r_j|}{v_z}$ , où  $\Delta T_n$  est une  
durée du signal acoustique,  $r_j$  est un emplacement du premier capteur de l'au moins

trois capteurs, et  $v_z$  est une vitesse du premier capteur se déplaçant le long du puits de forage.

9. Procédé de la revendication 8, dans lequel la technique de traitement du signal de réseau comprend :

5 l'application d'une opération de troncature aux signaux acoustiques pour produire des trames ;

l'application d'un estimateur d'échantillon de matrice de covariance aux trames pour produire un échantillon de matrice de covariance ;

10 l'application d'une opération de construction du spectre spatial de Capon utilisant les pondérations des vecteurs orientables modélisés indépendants de la durée et à pondération fixe à l'échantillon de la matrice de covariance pour produire une réponse du spectre spatial de Capon ; et

l'identification de l'emplacement du signal acoustique en se basant sur la réponse du spectre spatial de Capon.

15 10. Procédé de la revendication 1 ou la revendication 2, dans lequel la technique de traitement du signal de réseau comprend :

l'application d'une opération de décomposition de trames aux signaux acoustiques pour produire des trames décomposées ;

20 l'application d'un estimateur d'échantillon de matrice de covariance aux trames décomposées pour produire un échantillon de matrice de covariance ;

l'application d'une opération de construction du spectre spatial de Capon utilisant les pondérations des vecteurs orientables adaptatifs modélisés dépendants de la durée à l'échantillon de la matrice de covariance pour produire une réponse du spectre spatial de Capon ; et

25 l'application d'une opération de normalisation et d'addition à la réponse du spectre spatial de Capon pour produire une réponse moyenne pondérée du spectre spatial de Capon ; et

l'identification de l'emplacement du signal acoustique en se basant sur la réponse moyenne pondérée du spectre spatial de Capon.

30 11. Système comprenant :

un réseau de capteurs déplaçable le long d'un puits de forage et comprenant au moins trois capteurs acoustiques pour mesurer sensiblement simultanément des

signaux acoustiques provenant d'une source acoustique et de le recevoir au niveau de celui-ci ; et

un support non transitoire lisible par ordinateur codé par des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées, réalisent les opérations comprenant :

5 la mesure sensiblement simultanément de signaux provenant d'une source acoustique avec chacun de l'au moins trois capteurs dans un réseau de capteurs se déplaçant le long d'un puits de forage ; et

le traitement des signaux acoustiques en association utilisant une technique de traitement de signal de réseau qui comprend un vecteur adaptatif orientable modélisé  
10 dépendant de la durée pour la détermination d'une profondeur et d'une distance radiale à partir d'un puits de forage de la source acoustique.

12. Système de la revendication 11, dans lequel les capteurs acoustiques forment un réseau linéaire le long d'un axe longitudinal du puits de forage.

13. Système de la revendication 11 ou la revendication 12, dans lequel la  
15 technique de traitement du signal de réseau comprend au moins l'un choisi dans un groupe parmi un filtrage spatial, une estimation d'un temps de retard et une méthode son-énergie.

14. Système de la revendication 11 ou la revendication 12, dans lequel les capteurs acoustiques comprennent l'un choisi dans le groupe composé : d'un  
20 hydrophone omnidirectionnel, un capteur de réseau de fibre de Bragg ou un câble de fibre optique, et une quelconque combinaison de ceux-ci ;

15. Support non transitoire lisible par ordinateur codé par des instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées, réalisent les opérations comprenant :

la mesure sensiblement simultanément de signaux provenant d'une source  
25 acoustique avec chacun de l'au moins trois capteurs dans un réseau de capteurs se déplaçant le long d'un puits de forage ; et

le traitement des signaux acoustiques en association utilisant une technique de traitement de signal de réseau qui comprend un vecteur adaptatif orientable modélisé  
30 dépendant de la durée pour la détermination d'une profondeur et d'une distance radiale à partir d'un puits de forage de la source acoustique.

16. Support non transitoire lisible par ordinateur de la revendication 15 ou la revendication 16, dans lequel les capteurs acoustiques forment un réseau linéaire le long d'un axe longitudinal du puits de forage.

17. Support non transitoire lisible par ordinateur de la revendication 15 ou la revendication 16, dans lequel les instructions qui, lorsqu'elles sont exécutées, réalisent les opérations qui comprennent également : le calcul d'une position azimutale de la source acoustique.

5 18. Support non transitoire lisible par ordinateur de la revendication 15 ou la revendication 16, dans lequel une condition stationnaire du réseau de capteurs est préservée en satisfaisant  $\Delta T_n \leq \frac{0.01|r_j|}{v_z}$ , où  $\Delta T_n$  est une durée du signal acoustique,  $r_j$  est un emplacement d'un premier capteur d'au moins trois capteurs, et  $v_z$  est la vitesse à laquelle se déplace le premier capteur le long du puits de forage.

10 19. Support non transitoire lisible par ordinateur de la revendication 15 ou la revendication 16, dans lequel la technique de traitement du signal de réseau comprend :

l'application d'une opération de troncature aux signaux acoustiques pour produire des trames ;

15 l'application d'un estimateur d'échantillon de matrice de covariance aux trames pour produire un échantillon de matrice de covariance ;

l'application d'une opération de construction du spectre spatial de Capon utilisant les pondérations des vecteurs orientables modélisés indépendants de la durée et à pondération fixe à l'échantillon de la matrice de covariance pour produire une  
20 réponse du spectre spatial de Capon ; et

l'identification de l'emplacement du signal acoustique en se basant sur la réponse du spectre spatial de Capon.

25 20. Support non transitoire lisible par ordinateur de la revendication 15 ou la revendication 16, dans lequel la technique de traitement du signal de réseau comprend :

l'application d'une opération de décomposition de trame aux signaux acoustiques pour produire des trames décomposées ;

l'application d'un estimateur d'échantillon de matrice de covariance aux trames décomposées pour produire un échantillon de matrice de covariance ;

30 l'application d'une opération de construction du spectre spatial de Capon utilisant les pondérations des vecteurs orientables adaptatifs modélisés dépendants de

la durée à l'échantillon de la matrice de covariance pour produire une réponse du spectre spatial de Capon ; et

l'application d'une opération de normalisation et d'addition à la réponse du spectre spatial de Capon pour produire une réponse moyenne pondérée du spectre

5 spatial de Capon ; et

l'identification de l'emplacement du signal acoustique en se basant sur la réponse moyenne pondérée du spectre spatial de Capon.

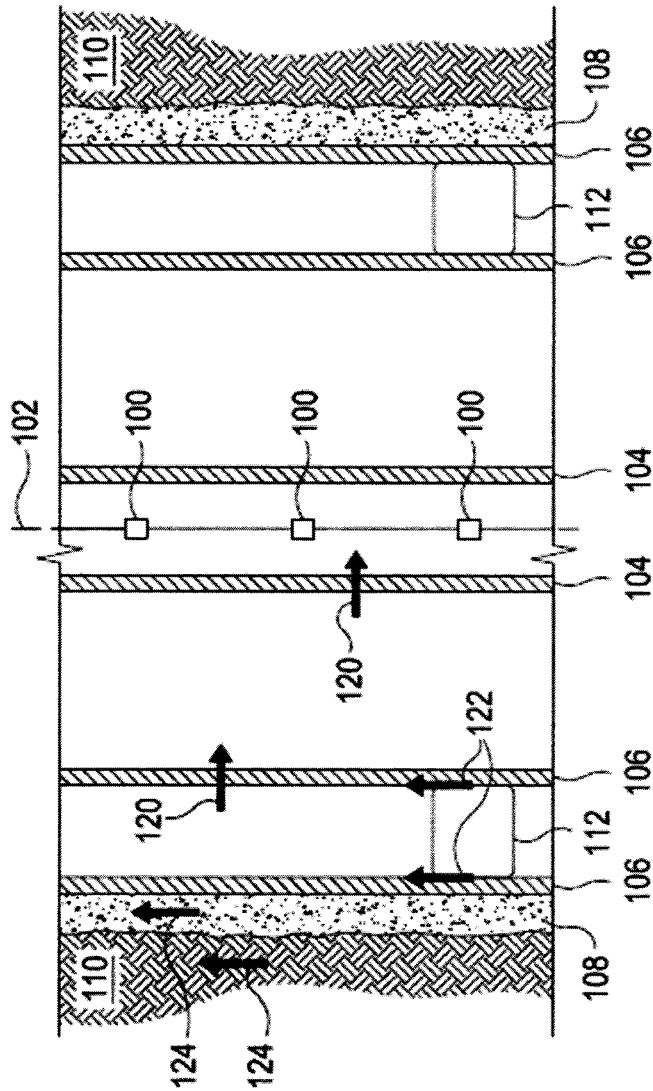


FIG. 1

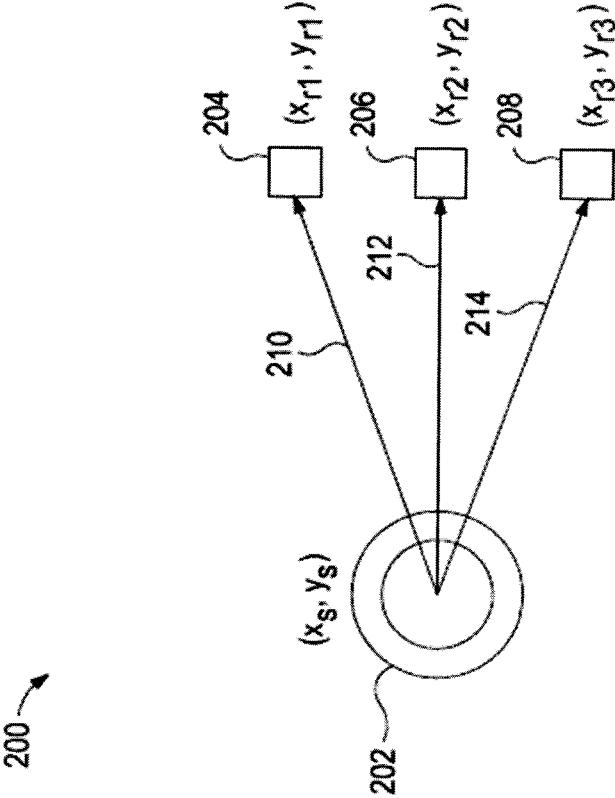


FIG. 2



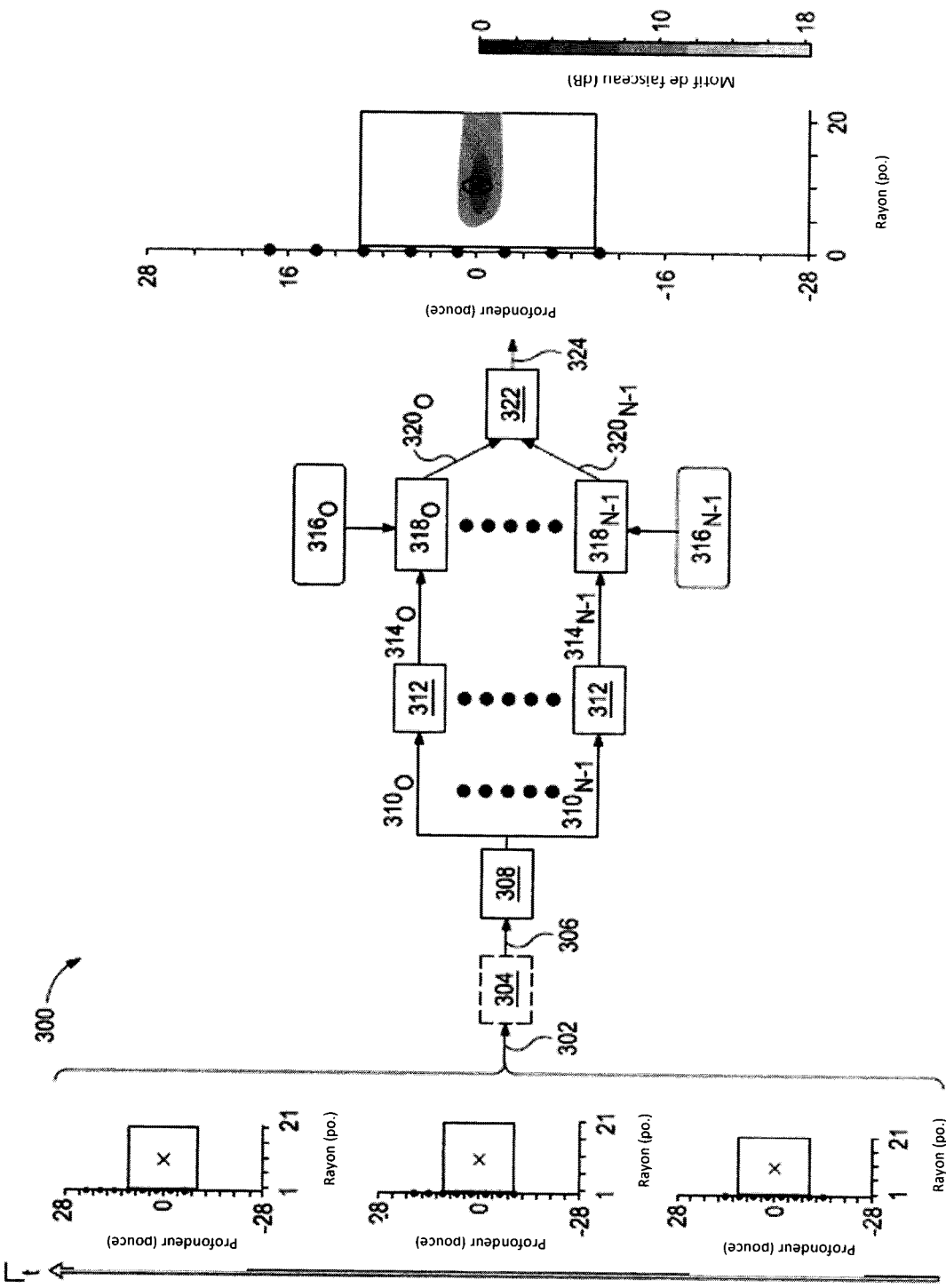


FIG. 3

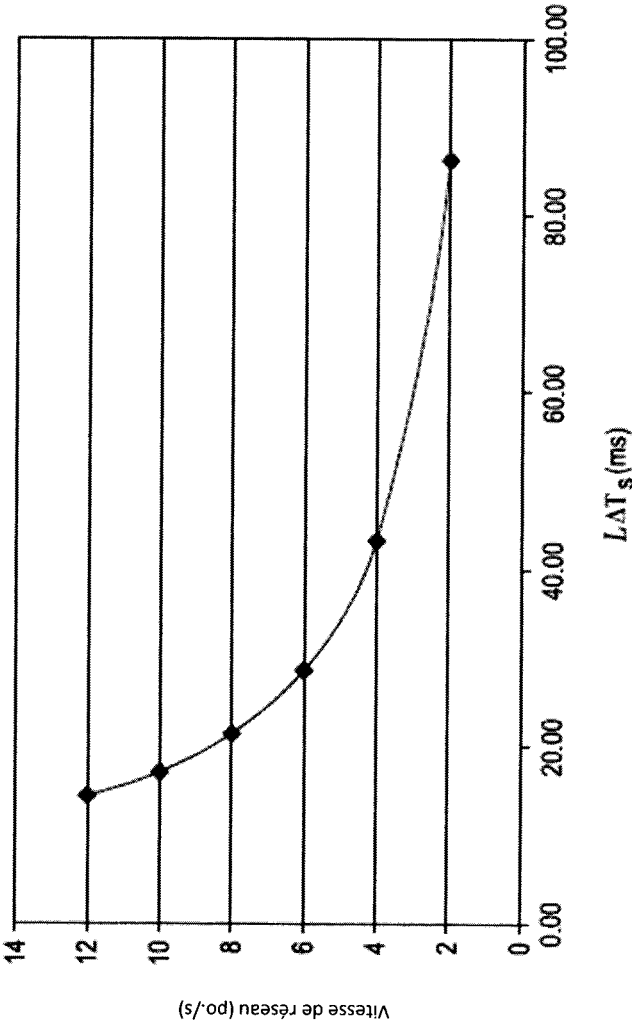


FIG. 4

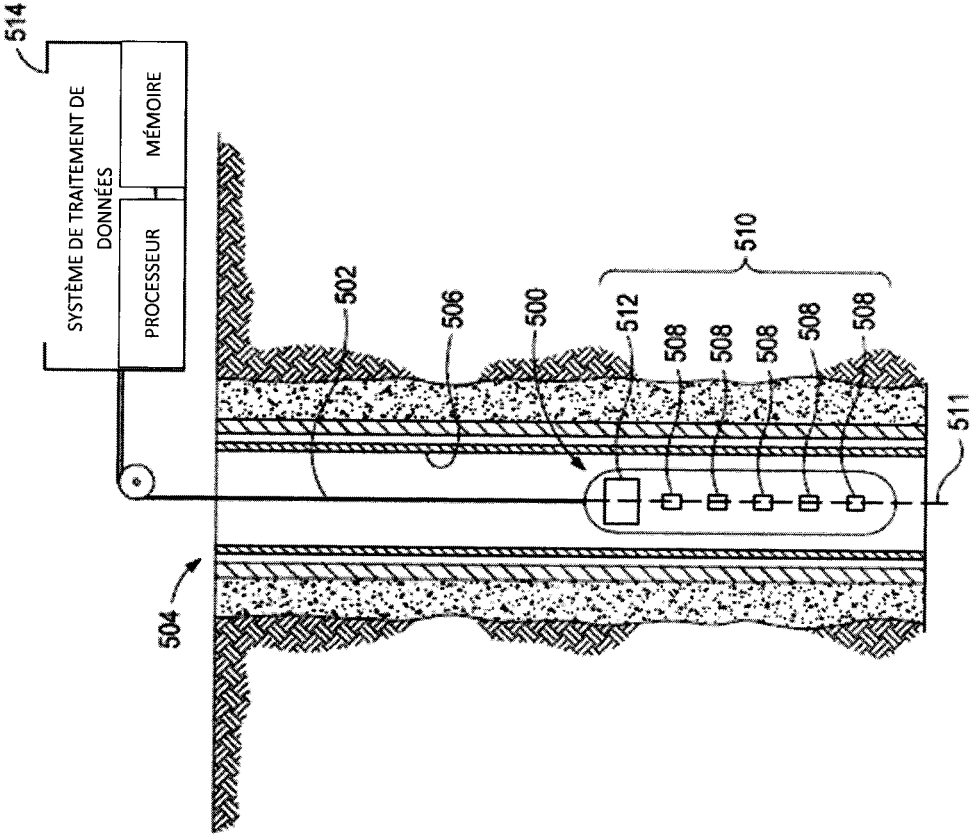
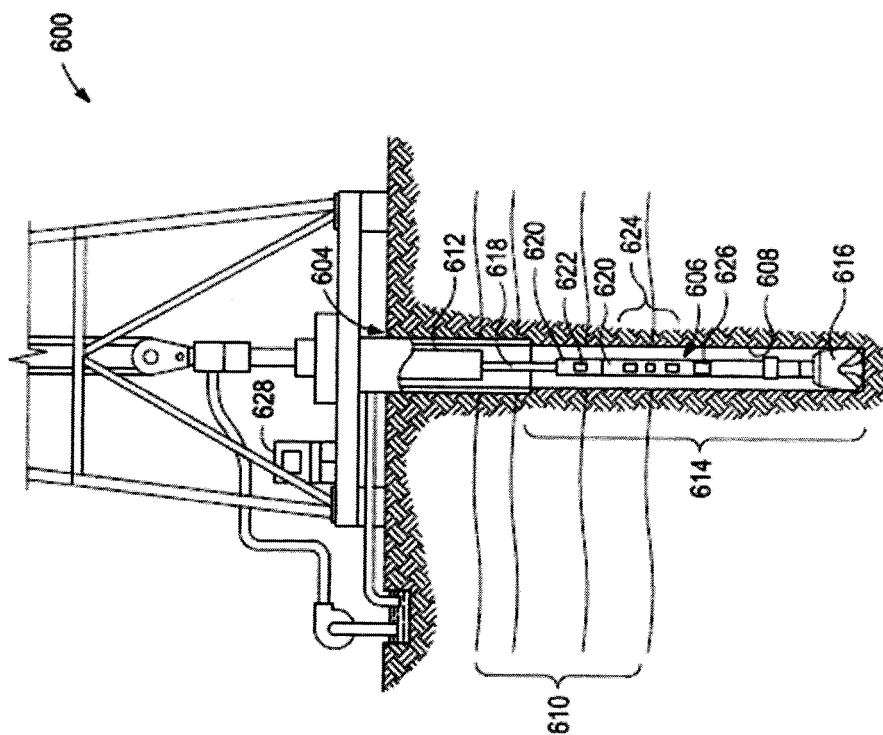


FIG. 5



**FIG. 6**

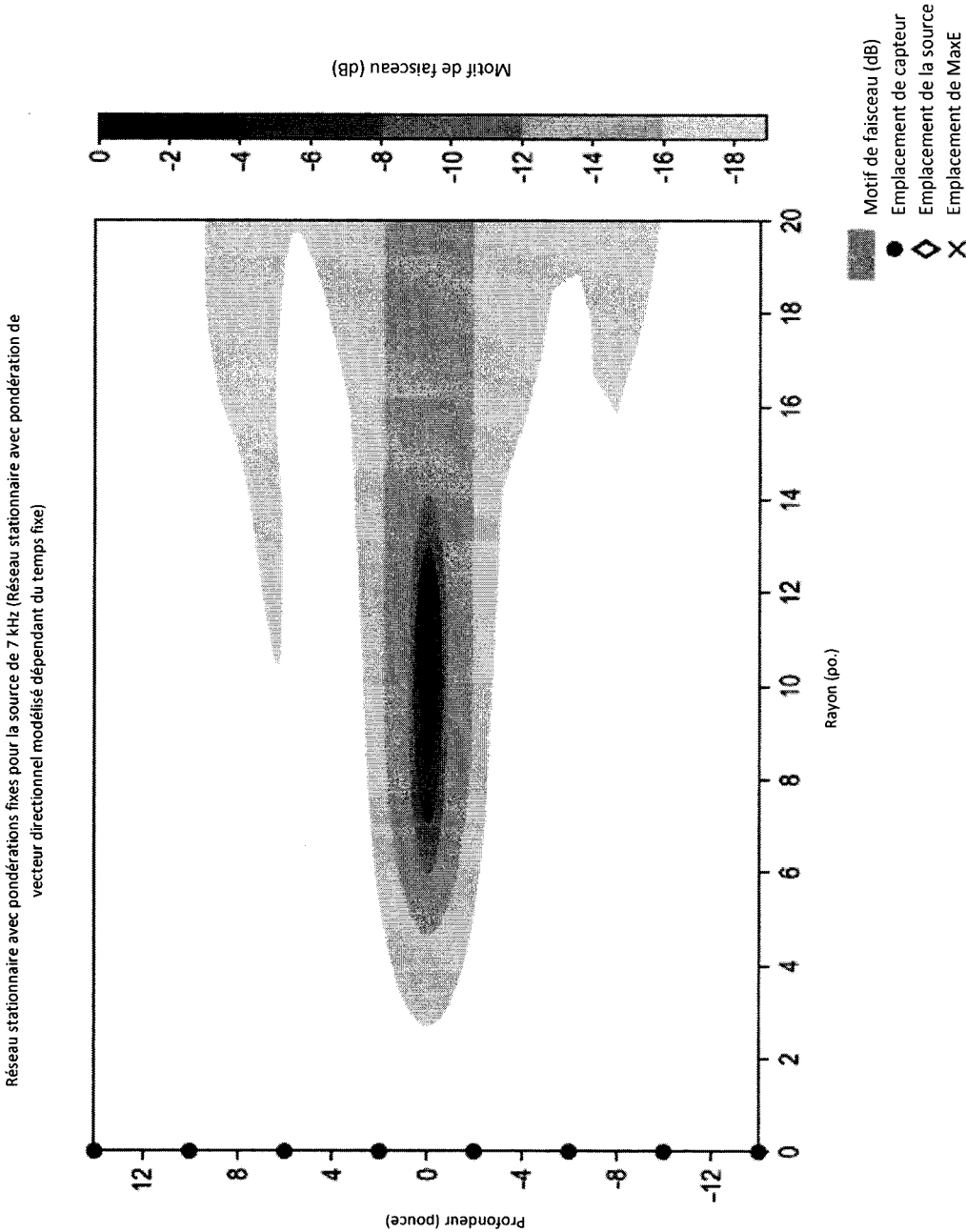


FIG. 7A

Réseau en déplacement avec pondérations fixes pour la source de 7 kHz  
(Réseau en déplacement avec pondération de vecteur directionnel modélisé  
dépendant du temps fixe)

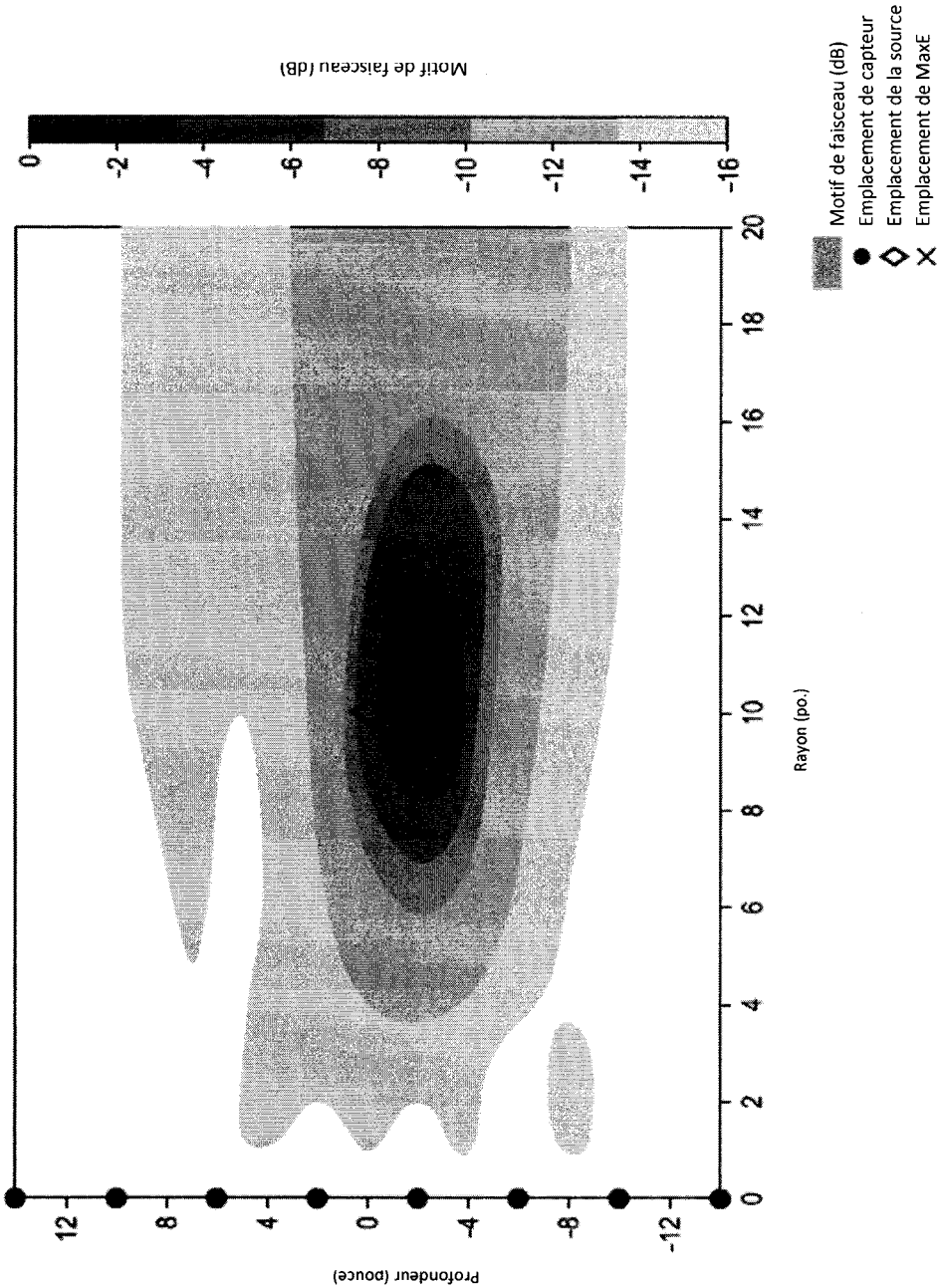


FIG. 7B

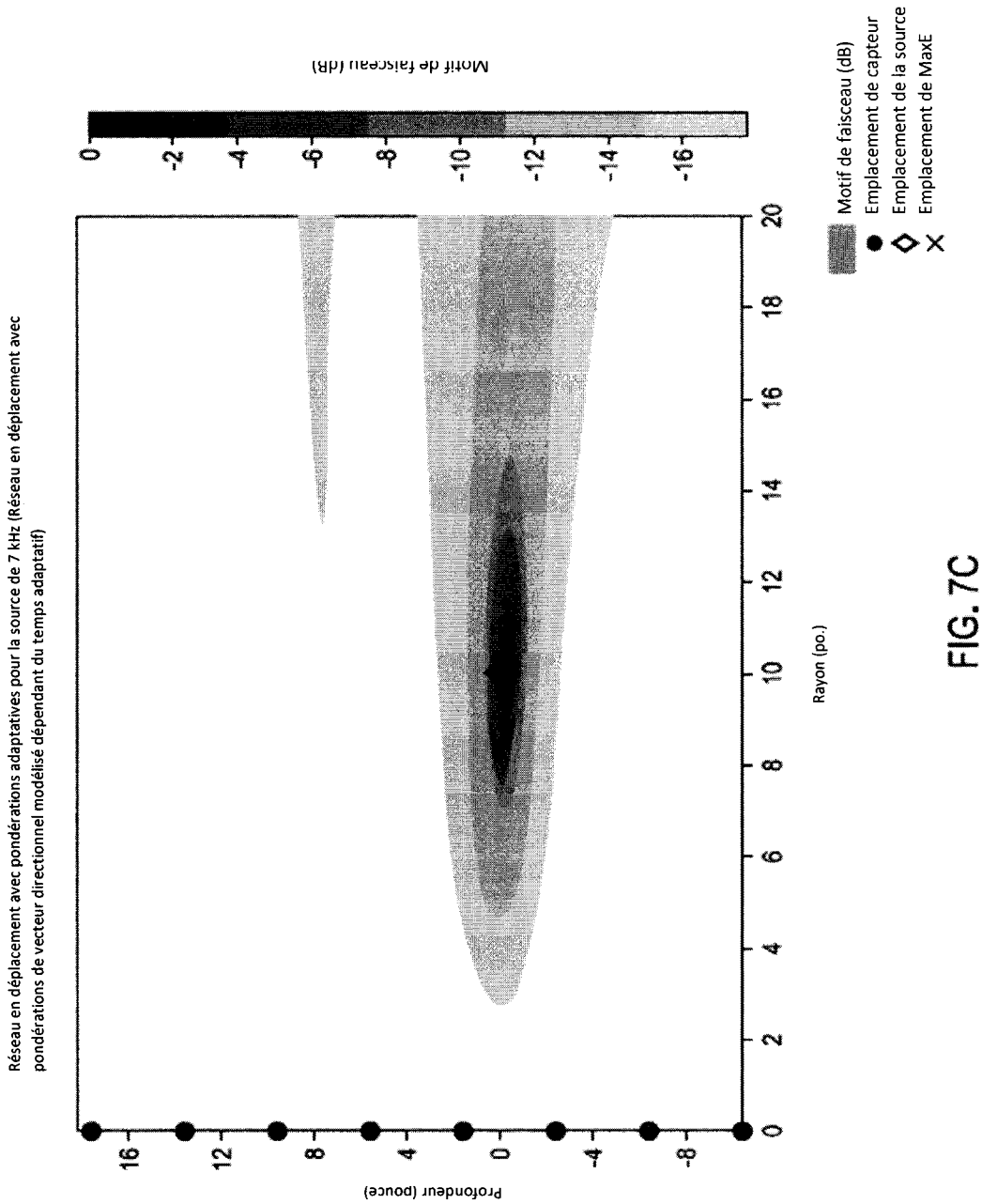


FIG.7C

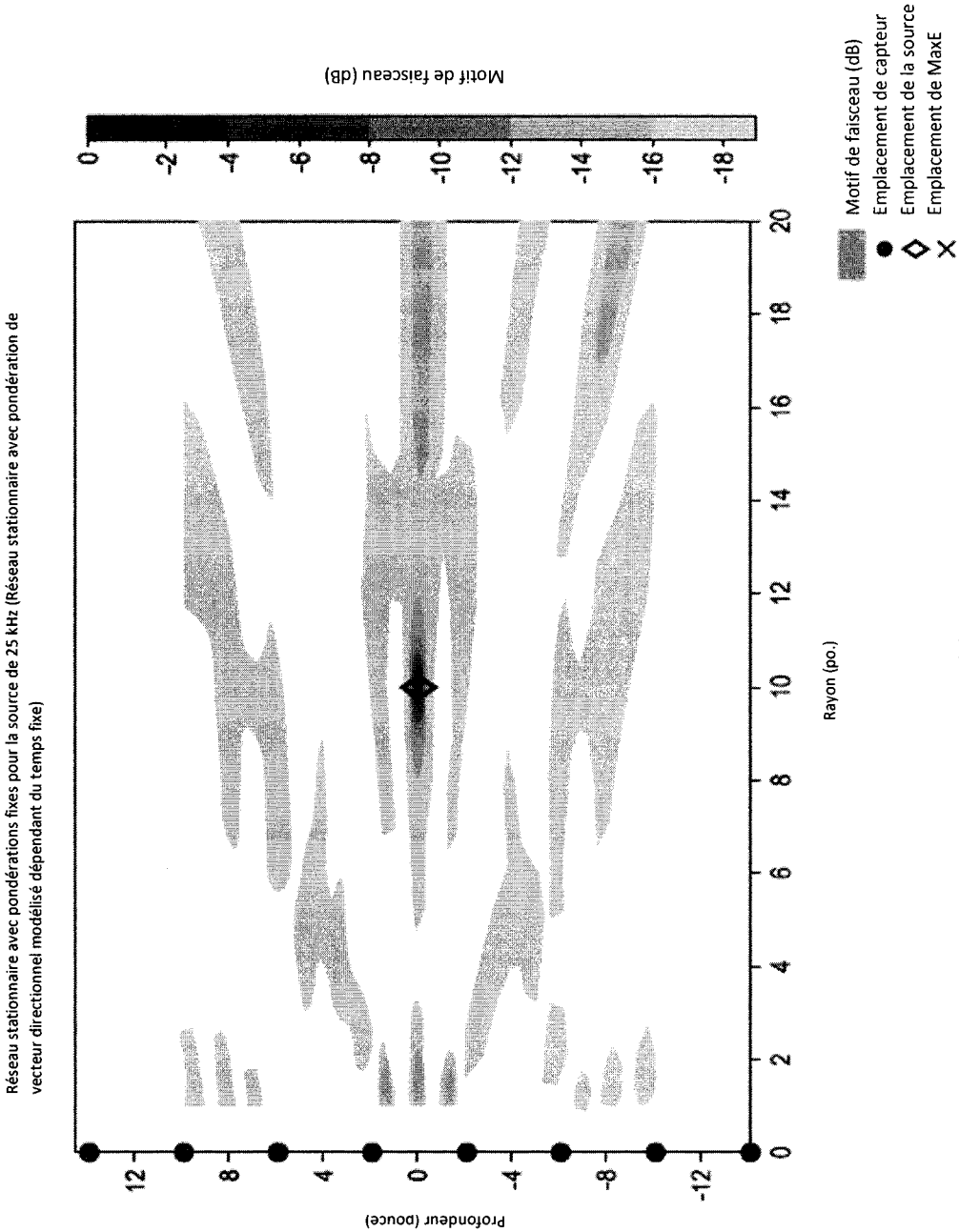


FIG. 8A



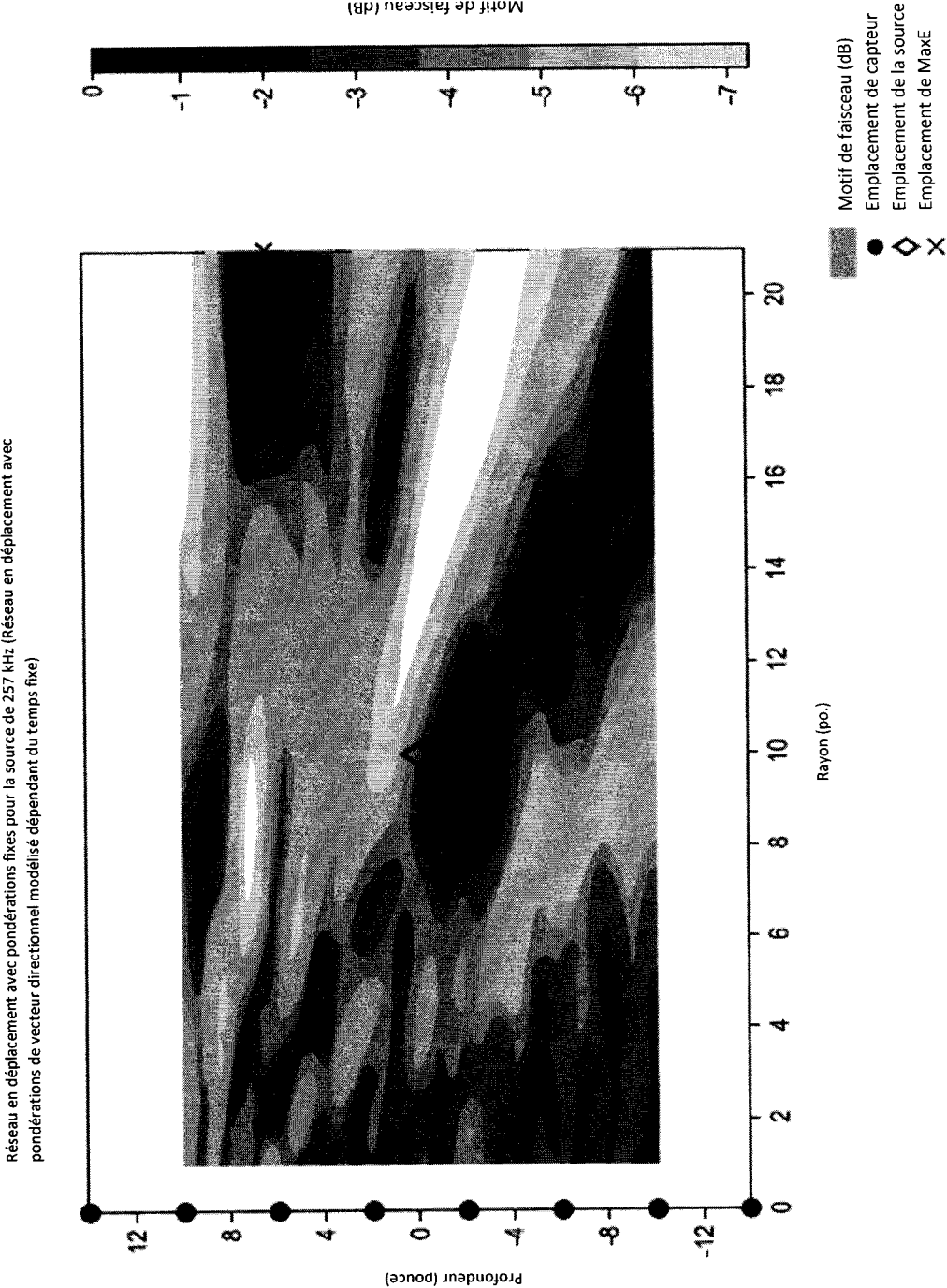


FIG. 8B

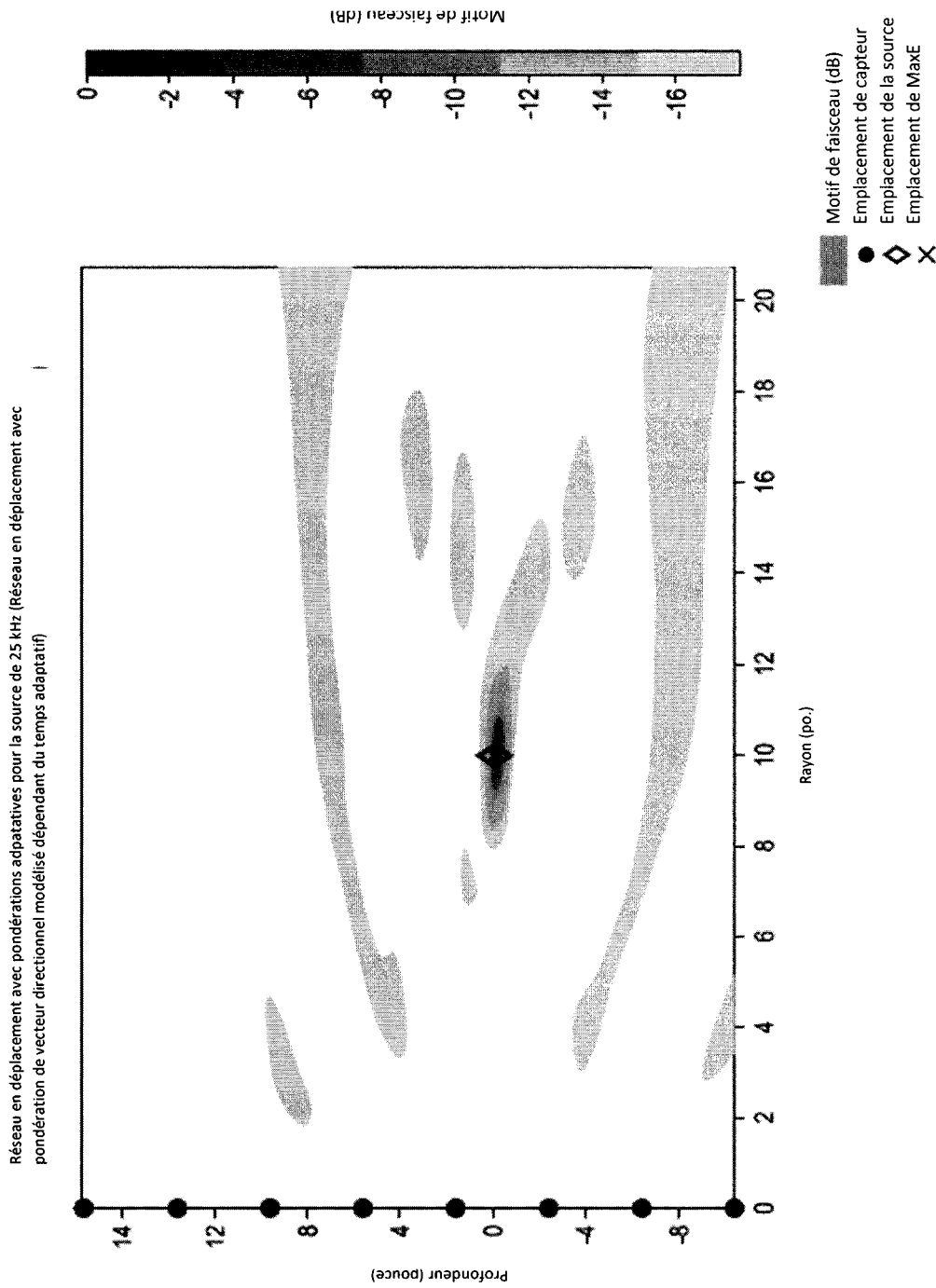


FIG. 8C

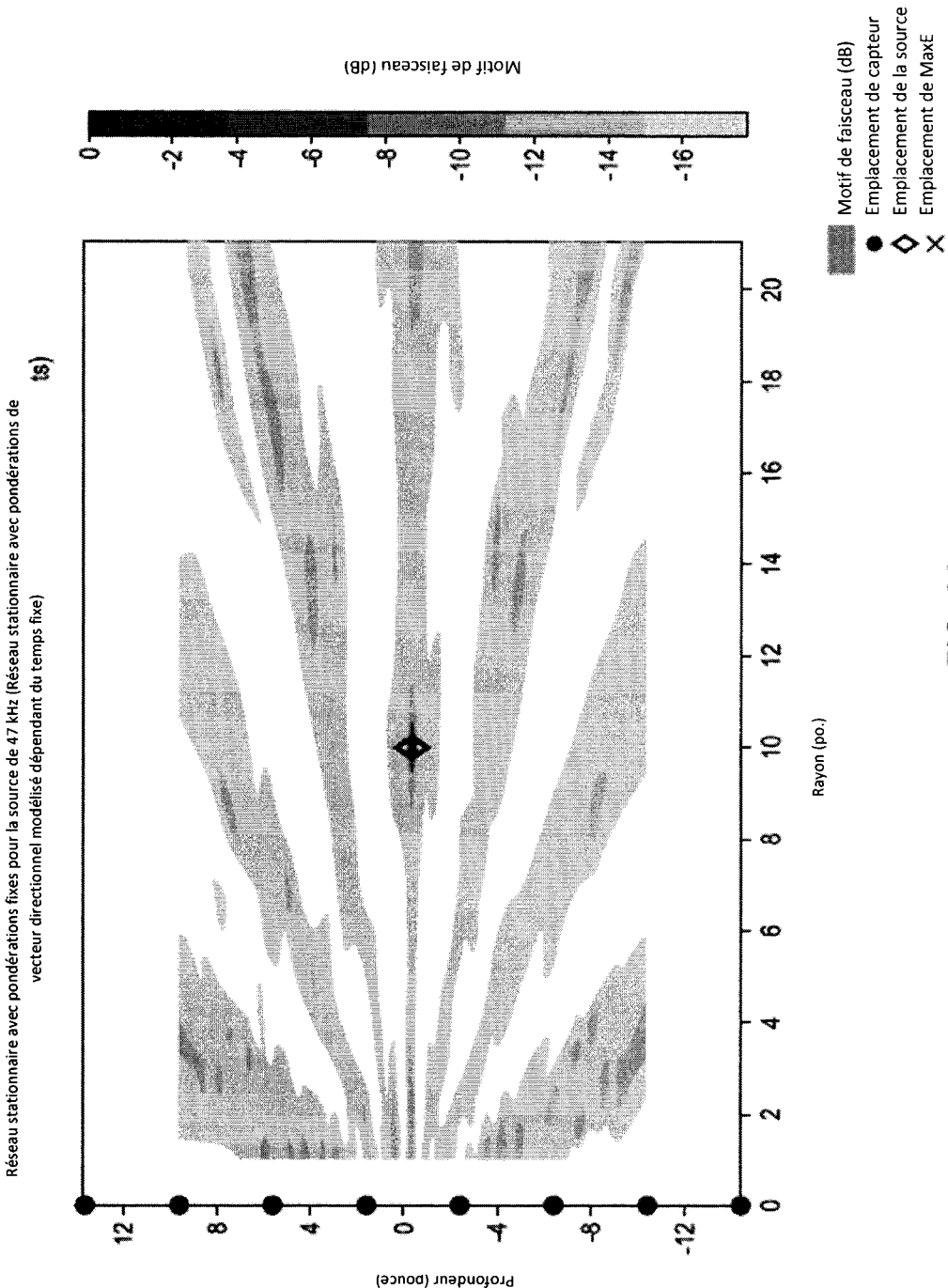


FIG. 9A

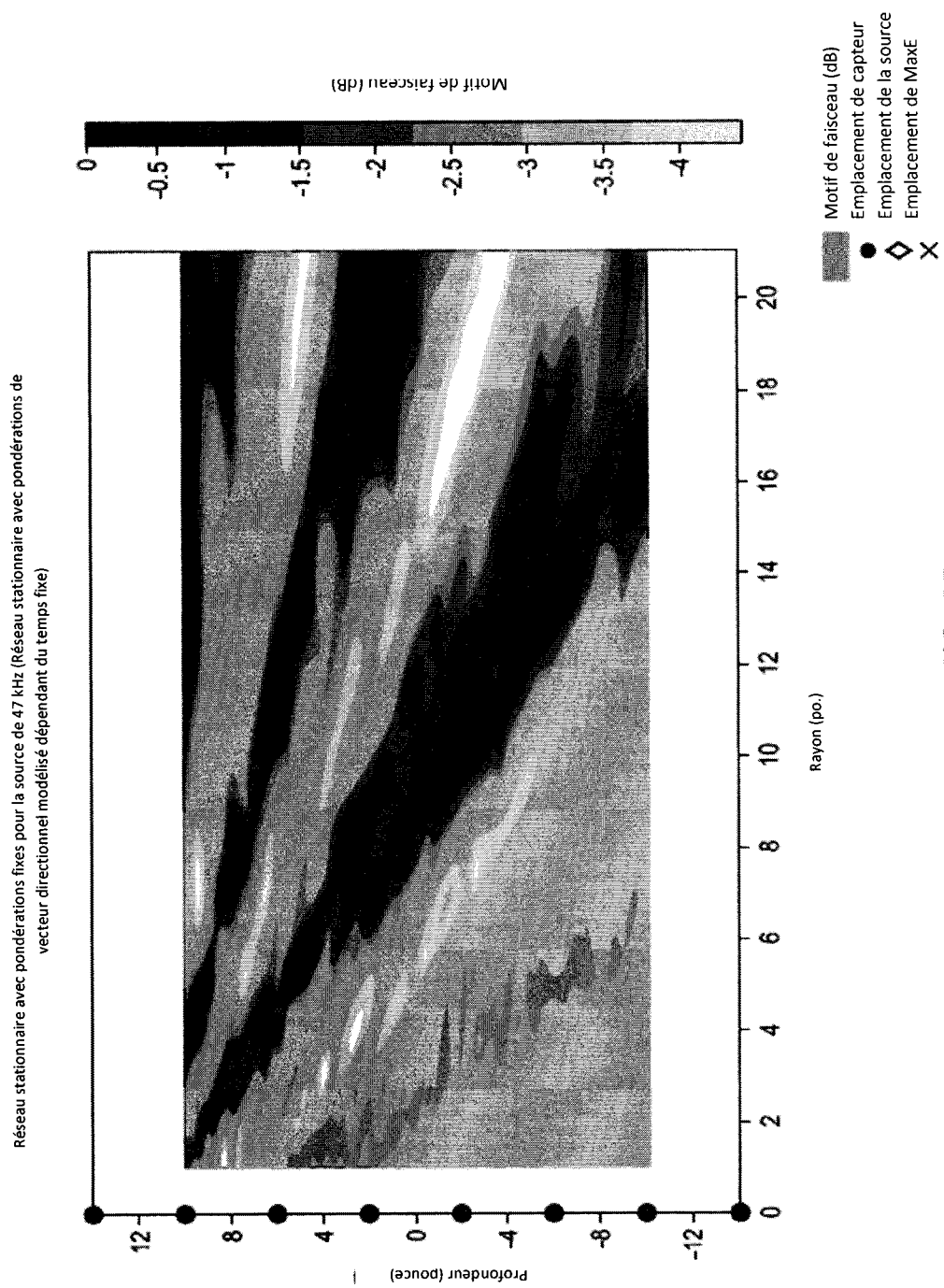


FIG. 9B

Réseau en déplacement avec pondérations adaptatives pour la source de 47 kHz (Réseau en déplacement avec pondération de vecteur directionnel modélisé dépendant du temps adaptatif)

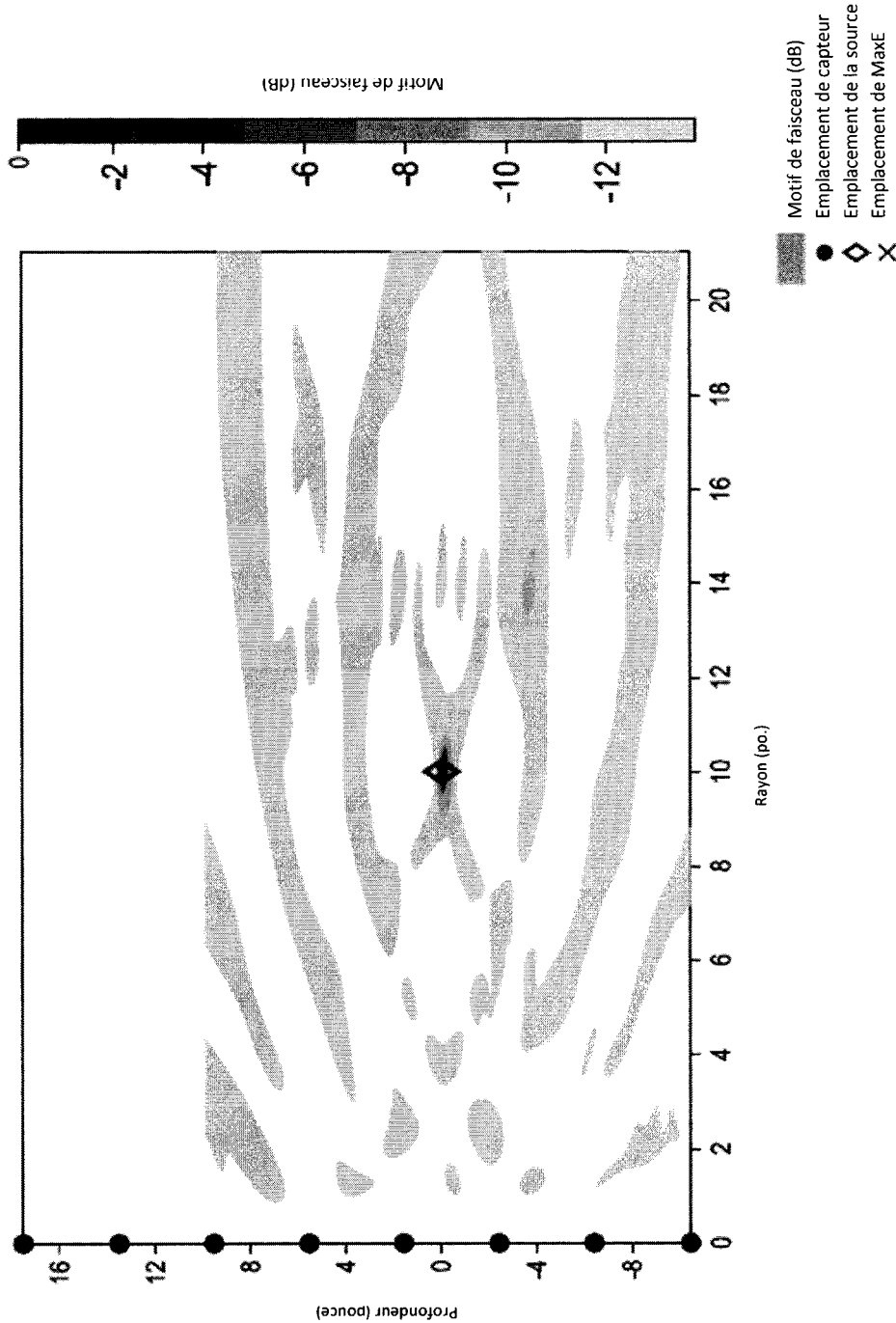


FIG. 9C