



(51) Classification internationale des brevets :  
**G01V 1/30** (2006.01) **G01V 1/28** (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2011/051720

(22) Date de dépôt international :  
19 juillet 2011 (19.07.2011)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
10 55945 21 juillet 2010 (21.07.2010) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :  
**TOTAL SA** [FR/FR]; 2 place Jean Millier La Défense 6,  
F-92400 Courbevoie (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **THORE, Pierre** [FR/FR]; c/o Total SA, CSTJF-EB279 Avenue Larribau, F-64000 Pau (FR). **HUBANS, Christian** [FR/FR]; c/o Total SA, CSTJF-EB279 Avenue Larribau, F-64000 Pau (FR).

(74) Mandataires : **LOISEL, Bertrand** et al.; Cabinet Plasseraud, 52 rue de la Victoire, F-75440 Paris Cedex 09 (FR).

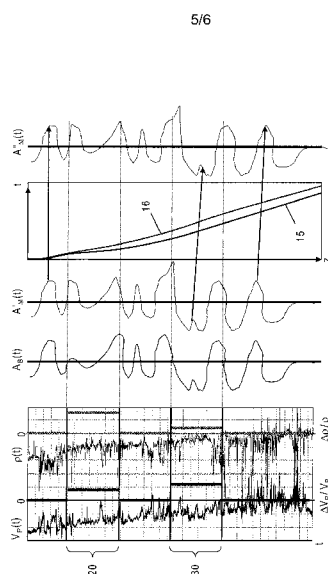
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR ESTIMATING ELASTIC PARAMETERS THROUGH INVERSION OF 4D SEISMIC MEASURES

(54) Titre : PROCEDE D'ESTIMATION DE PARAMETRES ELASTIQUES PAR INVERSION DE MESURES SISMIQUES 4D



(57) Abstract : In accordance with the 4D seismic technique, a base seismic trace is measured at a first time in a region of the subsoil, and then a monitor seismic trace corresponding to the base seismic trace is measured at a second time. To interpret the 4D measurements, assumptions are made about the variation of elastic parameters in permeable layers at predefined positions in one direction between the first and the second time. Elastic parameters include the density ( $\rho$ ) and the speed of propagation of the pressure waves ( $V_p$ ) in the permeable layers. Numerical evaluation is performed for a capability of each assumption about the variation of elastic parameters to give an account of a change between the measured base seismic trace and the measured monitor seismic trace, and the variation of the elastic parameters is estimated in accordance with an assumption of optimum capability.

(57) Abrégé : Conformément à la technique sismique 4D, une trace sismique base est mesurée en un premier temps dans une région du sous-sol, puis une trace sismique monitor correspondant à la trace sismique base est mesurée en un deuxième temps. Pour interpréter les mesures 4D, on fait des hypothèses de variation de paramètres élastiques dans des couches perméables de positions prédéfinies le long d'une direction entre le premier et le deuxième temps. Les paramètres élastiques incluant la densité ( $\rho$ ) et la vitesse de propagation des ondes de pression ( $V_p$ ) dans les couches perméables. On évalue

[Suite sur la page suivante]

**Déclarations en vertu de la règle 4.17 :**

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)*

**Publiée :**

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)*

**PROCEDE D'ESTIMATION DE PARAMETRES ELASTIQUES**  
**PAR INVERSION DE MESURES SISMIQUES 4D**

[0001] La présente invention concerne les méthodes géophysiques employées pour estimer des paramètres du sous-sol notamment dans le cadre de l'exploration et de la production d'hydrocarbures.

[0002] Elle concerne plus particulièrement les techniques dites de sismique 4D. Dans ces techniques, on dispose de premiers enregistrements sismiques, obtenus dans un premier temps lors d'une campagne de mesures "de base" ("base survey"), par exemple avant la mise en production d'un réservoir d'hydrocarbures, et on procède à une campagne ultérieure de mesures ("monitor survey"), par exemple après quelques années d'exploitation du réservoir, pour obtenir des seconds enregistrements sismiques. Les enregistrements sismiques (ou traces sismiques) base et monitor sont comparés pour estimer des variations de paramètres physiques des couches géologiques dans la zone explorée.

[0003] Les paramètres dont les variations sont ainsi estimées peuvent comprendre la densité  $\rho$ , la vitesse  $V_P$  de propagation des ondes de pression (ondes P) et la vitesse  $V_S$  de propagation des ondes de cisaillement (ondes S) dans les milieux formant les différentes couches géologiques de la zone explorée. On fait souvent référence aux impédances sismiques dans chaque milieu,  $I_P = \rho \times V_P$  et  $I_S = \rho \times V_S$ , qui gouvernent la propagation des ondes P et S dans les couches. Du fait des changements liés à l'exploitation pétrolière, par exemple le remplacement d'huile par de l'eau ou du gaz, les paramètres  $\rho$ ,  $V_P$ ,  $V_S$  sont modifiés dans certaines couches. Il en résulte des changements d'amplitude dans les enregistrements sismiques, ainsi que des décalages temporels des traces sismiques enregistrées. L'analyse comparative des enregistrements comprend une inversion pour estimer les variations des paramètres afin de se faire une idée des niveaux de saturation dans les couches exploitées.

[0004] Une méthode d'inversion utilisable pour analyser les décalages

temporels dans les traces sismiques base et monitor (dépendant des variations de vitesses de propagation) en même temps que les changements d'amplitude (dépendant des variations d'impédances) est décrite dans EP 1 865 340 A1.

[0005] Une technique de sismique 3D, c'est-à-dire basée sur une seule  
5 campagne de mesures, prenant en compte des mesures faites dans des puits ("well log") est décrite dans le brevet US 5,798,982. qui mentionne aussi une extension de la technique à la sismique 4D par comparaison de blocs sismiques inversés

[0006] Un autre procédé d'analyse de données sismiques 4D, décrit dans  
10 WO 2008/140655 A1, utilise une inversion à base de modèle ("model-based") au niveau d'un ou plusieurs puits où des logs ont été enregistrés. Le document ne décrit pas la méthode d'inversion ni la manière de paramétrer le modèle. Les résultats de l'inversion sont ensuite étendus en s'éloignant du puits, par une méthode statistique. Un calcul de corrélation est effectué pour ramener le  
15 repère de temps des enregistrements monitor sur celui des enregistrements base. Avec le modèle utilisé, la méthode cherche à estimer directement des variations de niveaux de saturation et des variations de pression dans les couches géologiques.

[0007] L'invention vise à enrichir les techniques de sismique 4D,  
20 notamment en leur faisant prendre en compte des contraintes géologiques et dynamiques.

[0008] Il est proposé un procédé d'estimation de paramètres élastiques d'une région du sous-sol, comprenant:

- mesurer au moins une trace sismique base en un premier temps;
- 25 - mesurer, en un deuxième temps, au moins une trace sismique monitor correspondant à la trace sismique base;
- faire des hypothèses de variation de paramètres élastiques dans des couches perméables de positions prédéfinies le long d'une direction entre le premier et le deuxième temps, les paramètres élastiques incluant la  
30 densité et la vitesse de propagation des ondes de pression dans chacune desdites couches perméables;

- évaluer numériquement une capacité de chaque hypothèse de variation de paramètres élastiques à rendre compte d'une évolution entre la trace sismique base mesurée et la trace sismique monitor mesurée;
- estimer la variation des paramètres élastiques conformément à une hypothèse ayant une capacité évaluée optimale.

5 [0009] La technique utilise un a priori géologique-dynamique pour estimer les paramètres 4D à l'échelle réservoir. Cette estimation est effectuée le long d'une direction prédéfinie, en général verticale. Il peut s'agir de la direction d'un puits foré dans la zone étudiée ou, dans certaines réalisations, d'une direction choisie arbitrairement sans avoir à être localisée sur un puits.

10 [0010] Lorsque les vitesses de propagation qu'il s'agit d'estimer se limitent à la vitesse de propagation des ondes de pression  $V_P$ , les traces sismiques base et monitor peuvent être mesurées en envoyant des ondes sismiques sous incidence normale vers des couches se succédant le long de ladite direction et en recueillant les ondes sismiques réfléchies par des interfaces entre lesdites couches. La méthode peut aussi s'étendre à l'estimation des vitesses de propagation des ondes de cisaillement dans les couches perméables, les traces sismiques base et monitor étant alors mesurées en envoyant des ondes sismiques sous incidence non normale vers des couches se succédant le long de ladite direction et en recueillant les ondes sismiques réfléchies par les interfaces entre lesdites couches. Les paramètres élastiques dont on teste les variations peuvent aussi inclure la position, le long de ladite direction, d'au moins une interface délimitant l'une desdites couches perméables.

25 [0011] Dans un mode de réalisation du procédé, les variations de paramètres élastiques sont prises en compte dans des couches perméables le long d'un puits foré dans le sous-sol. Les couches perméables sont typiquement positionnées le long de ladite direction, qui est alors la direction de forage du puits, à partir de mesures (logs) effectuées dans le puits. Une autre possibilité, si le puits est en exploitation, est de définir les positions des couches perméables le long du puits à partir de positions de percements réalisés dans un tubage du puits.

30

[0012] Pour un puits en exploitation, il est courant d'avoir à disposition une grille réservoir servant aux ingénieurs réservoir pour prévoir la production. Une grille réservoir est construite par une technique de géomodélisation à partir d'informations structurales dérivées des enregistrements sismiques et des puits. Cette grille est remplie avec les propriétés physiques des roches, notamment la perméabilité et la porosité, calibrées sur les données de puits. Typiquement, un certain nombre de puits sont forés dans la zone mise en exploitation, et les données issues des logs sont interpolées entre puits pour établir une première grille qui est ensuite affinée à l'aide des enregistrements sismiques. Dans le contexte de la présente invention, la grille réservoir peut être utilisée pour fournir l'a priori géologique exploité dans l'inversion 4D.

[0013] Les positions des couches perméables le long de la direction précitée sont alors définies à partir de la grille réservoir. Il est à noter que ceci permet de mettre en œuvre le procédé au niveau d'un puits, les valeurs de paramètres élastiques dont les variations sont testées étant celles localisées le long du puits dans la grille réservoir, mais aussi en l'absence de puits. Dans ce dernier cas, les couches perméables où les paramètres élastiques sont estimés sont celles que rencontre ladite direction dans la grille réservoir. Si la résolution de la grille réservoir est trop fine, il est possible d'agréger plusieurs couches de celle-ci dans une seule couche perméable prise en compte dans l'inversion 4D.

[0014] Un certain nombre d'approches sont possibles pour l'évaluation numérique de la capacité d'une hypothèse de variation de paramètres élastiques à rendre compte de l'évolution entre la trace sismique base mesurée et la trace sismique monitor mesurée.

[0015] Lorsque les paramètres élastiques sont estimés le long d'un puits, on peut obtenir, pour chaque hypothèse de variation, des valeurs des paramètres élastiques au niveau du puits pour le deuxième temps à partir de valeurs des paramètres élastiques mesurées au niveau du puits dans le premier temps (logs). Selon une approche, on calcule une trace sismique base simulée à partir d'une ondelette représentative d'un signal sismique incident et des valeurs des paramètres élastiques mesurées au niveau du puits dans le

premier temps, on calcule une trace sismique monitor simulée à partir de ladite ondelette et des valeurs des paramètres élastiques au niveau du puits obtenues pour le deuxième temps, et on compare la différence entre la trace sismique monitor mesurée et la trace sismique base mesurée à la différence entre la trace sismique monitor simulée et la trace sismique base simulée. Si la comparaison révèle qu'une condition prédéterminée est remplie (par exemple, la différence entre les deux différences de trace est au-dessous d'un seuil, ou est la plus basse observée pour un ensemble d'hypothèses de variation testées), l'hypothèse de variation, considérée comme ayant une capacité optimale, est retenue pour l'estimation des paramètres élastiques dans le deuxième temps (monitor).

[0016] Dans une autre approche, on estime une perturbation en amplitude de la trace sismique base mesurée par suite d'un passage des paramètres élastiques au niveau du puits des valeurs mesurées dans le premier temps aux valeurs obtenues pour le deuxième temps, on calcule une pseudo-trace sismique en combinant l'une des traces sismiques mesurées avec la perturbation en amplitude estimée, et on compare, sur une même échelle de temps, l'autre des traces sismiques mesurées à la pseudo-trace sismique calculée. Le résultat de la comparaison peut alors être exploité pour décider de l'estimation des paramètres élastiques.

[0017] L'estimation de la perturbation en amplitude peut utiliser les logs enregistrés avant mise en exploitation du puits (temps base). Elle comprend alors le calcul d'une trace sismique base simulée à partir d'une ondelette représentative d'un signal sismique incident et des valeurs des paramètres élastiques mesurées au niveau du puits dans le premier temps, le calcul d'une trace sismique monitor simulée à partir de ladite ondelette et des valeurs des paramètres élastiques au niveau du puits obtenues pour le deuxième temps, les traces sismiques base et monitor simulées étant calculées avec une même loi de conversion profondeur-temps, et une soustraction entre la trace sismique base simulée et la trace sismique monitor simulée pour obtenir la perturbation en amplitude estimée.

[0018] Une autre approche encore peut être adoptée avec ou sans la

présence d'un puits. Elle consiste à estimer une perturbation en amplitude de la trace sismique base mesurée par suite de la variation des paramètres élastiques, à calculer une pseudo-trace sismique en combinant l'une des traces sismiques mesurées avec la perturbation en amplitude estimée, et à comparer, sur une même échelle de temps, l'autre des traces sismiques mesurées à la pseudo-trace sismique calculée. La perturbation en amplitude peut être estimée de manière approchée en fonction de variations d'impédance dans les couches perméables, déduites de l'hypothèse de variation des paramètres élastiques, et d'une ondelette représentative d'un signal sismique incident.

- 10 [0019] Dans un mode de réalisation, la capacité d'une hypothèse de variation de paramètres élastiques à rendre compte de l'évolution entre la trace sismique base mesurée et la trace sismique monitor mesurée est évaluée numériquement en ramenant dans le référentiel base la trace sismique monitor déformée en fonction des hypothèses de variation des paramètres élastiques.
- 15 La trace sismique mesurée qu'on combine avec la perturbation en amplitude estimée pour le calcul de la pseudo-trace sismique est alors la trace sismique monitor mesurée, et la combinaison comprend une modification de l'échelle de temps de la trace sismique monitor mesurée pour tenir compte de la variation de vitesse de propagation des ondes sismiques conforme à l'hypothèse de
- 20 variation de paramètres élastiques, et l'obtention de la pseudo-trace sismique en soustrayant la perturbation en amplitude estimée de la trace sismique monitor mesurée modifiée.

- [0020] D'autres particularités et avantages de la présente invention apparaîtront dans la description ci-après d'un exemple de réalisation non
- 25 limitatif, en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 est un schéma illustrant un mode de mesures sismiques à proximité d'un puits;
- la figure 2 est un diagramme illustrant la synthèse d'une trace sismique à partir de mesures effectuées dans un puits (logs);
- 30 - la figure 3 est un diagramme illustrant l'évolution d'une trace sismique base vers une trace sismique monitor en fonction d'une hypothèse de

variation de la densité et de la vitesse de propagation des ondes de pression dans des couches perméables le long du puits;

- la figure 4 est un diagramme illustrant un premier mode de réalisation du procédé d'estimation de paramètres élastiques selon l'invention;
- 5 - les figures 5 et 6 sont des diagrammes illustrant deux autres modes de réalisation du procédé;
- la figure 7 est un schéma illustrant un autre mode d'acquisition d'une trace sismique exploitable dans une réalisation du procédé.

[0021] La figure 1 illustre une zone d'exploitation pétrolière où un puits 10 a  
10 été foré. Ce puits 10 traverse des couches, représentées très schématiquement sur la figure 1, ayant des paramètres élastiques variables.

[0022] Avant la mise en place du tubage du puits, un certain nombre de mesures (logs) ont été réalisées dans celui-ci afin de connaître, avec une  
résolution de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, les valeurs de  
15 différents paramètres physiques des roches traversées par le puits. Ces paramètres incluent notamment la porosité, la perméabilité, la densité et la vitesse de propagation des ondes de pression. La partie gauche de la figure 2 montre un exemple d'enregistrement de la vitesse  $V_P$  de propagation des ondes de pression et de la densité  $\rho$  des formations rocheuses en fonction de  
20 la profondeur le long du puits.

[0023] Lors d'une campagne de mesures sismiques dans la région considérée, une source d'ondes sismiques 11 est successivement placée à différents endroits en surface, ou dans la mer dans le cas d'une zone offshore, et un ou plusieurs détecteurs d'ondes sismiques 12 recueillent les ondes  
25 sismiques provenant de la source 11 qui se sont réfléchies sur les interfaces entre les couches géologiques rencontrées. La figure 1 illustre le cas particulier où la source 11 et le détecteur 12 sont placés à proximité immédiate du puits 10 afin d'enregistrer des ondes sismiques qui se sont propagées verticalement le long du puits avec une incidence approximativement normale  
30 sur les interfaces entre couches.

[0024] Dans cette configuration, l'amplitude du signal sismique recueilli par

le détecteur 12 est modélisable par une convolution de l'impédance sismique  $I_P = \rho \times V_P$  relative aux ondes de pression avec une ondelette  $w(t)$  représentant la forme d'onde du signal émis par la source 11 :

$$\hat{A}(t) = \sum_{\tau} \rho(\tau) \cdot V_P(\tau) \cdot w(t - \tau) = I_P(t) * w(t) \quad (1)$$

5 [0025] Cette modélisation est illustrée par la figure 2 où la première étape consiste à convertir les logs  $V_P(z)$ ,  $\rho(z)$  obtenus en fonction de la profondeur dans le puits en logs  $V_P(t)$ ,  $\rho(t)$  exprimés en fonction du temps de propagation des ondes pour pouvoir être convolués selon (1). La loi de conversion profondeur-temps utilisée pour cela est directement déduite de l'évolution de la  
10 vitesse  $V_P$  le long du puits. La convolution de l'impédance  $I_P = \rho \times V_P$  par l'ondelette  $W(t)$  permet de synthétiser une trace sismique  $\hat{A}(t)$  représentée en partie droite de la figure 2.

[0026] En général, on peut disposer du profil des paramètres  $V_P$  et  $\rho$  le long du puits à l'aide des logs initialement effectués, c'est-à-dire dans le temps  
15 base. Mais dans le temps monitor de la sismique 4D (typiquement quelques années après le temps base), on n'accède plus à la paroi du puits pour pouvoir y mesurer les valeurs de  $V_P$  et  $\rho$  qui ont pu évoluer en raison de l'exploitation.

[0027] Cependant, on est capable de formuler des hypothèses sur les variations  $\Delta V_P$  et  $\Delta \rho$  des paramètres entre le temps base et le temps monitor et  
20 de tester la capacité de ces hypothèses de variation à rendre compte des modifications des traces sismiques enregistrées dans des conditions semblables au temps base et au temps monitor. Il est commode d'exprimer ces variations de paramètres de manière relative, c'est-à-dire sous la forme  $\Delta V_P/V_P$  et  $\Delta \rho/\rho$ .

25 [0028] En général, ce sont dans les couches perméables rencontrées le long du puits que les paramètres  $V_P$  et  $\rho$  auront évolué de la manière la plus significative car c'est dans ces couches que l'huile extraite du sous-sol s'écoule lors de l'exploitation. Sur la partie gauche de la figure 3, on a représenté deux

couches perméables 20, 30 dans lesquelles la vitesse  $V_P$  et la densité  $\rho$  ont pu évoluer entre le temps base et le temps monitor, une hypothèse de variation  $\Delta V_P/V_P$  et  $\Delta \rho/\rho$  étant indiquée dans ces couches (en pratique, le nombre de ces couches est bien supérieur à 2). On est alors capable de synthétiser une

5 trace sismique base simulée  $\hat{A}_B(t)$  et une trace sismique monitor simulée  $\hat{A}_M(t)$  :

$$\hat{A}_B(t) = \sum_{\tau} \rho(\tau) \cdot V_P(\tau) \cdot w(t - \tau) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \hat{A}_M(t) &= \sum_{\tau} [\rho(\tau) + \Delta \rho(\tau)] \cdot [V_P(\tau) + \Delta V_P(\tau)] \cdot w(t - \tau) \\ &= \sum_{\tau} \rho(\tau) \cdot V_P(\tau) \cdot \left[1 + \frac{\Delta \rho}{\rho}(\tau)\right] \cdot \left[1 + \frac{\Delta V_P}{V_P}(\tau)\right] \cdot w(t - \tau) \end{aligned} \quad (3)$$

10 [0029] Le changement de la densité  $\rho$  et de la vitesse  $V_P$  consécutif à la production pétrolière a deux effets sur la modélisation:

- un changement dans la relation profondeur-temps utilisée pour la conversion des logs  $\rho(z) \rightarrow \rho(t)$  et  $V_P(z) \rightarrow V_P(t)$ ;

15 - un changement d'amplitude dû au changement d'impédance comme l'indique la formule (3) ci-dessus.

[0030] À partir de ces expressions (2) et (3), on peut vérifier si l'hypothèse de variation  $\Delta V_P/V_P$  et  $\Delta \rho/\rho$  rend bien compte de l'évolution observée entre deux traces sismiques  $A_B(t)$ ,  $A_M(t)$  successivement mesurées au temps base et au temps monitor.

20 [0031] La figure 4 illustre une première manière de procéder à cette vérification. La partie gauche de la figure 4 montre les logs  $V_P(t)$  et  $\rho(t)$  mesurés en fonction de la profondeur au temps base et convertis pour être exprimés en fonction du temps de propagation, ainsi que plusieurs hypothèses  $\Delta V_P/V_P$ ,  $\Delta \rho/\rho$  de variation des paramètres dans les couches perméables 20,

25 30.

[0032] Par le mécanisme illustré par la figure 3, on obtient des traces

sismiques simulées base et monitor  $\hat{A}_B(t)$ ,  $\hat{A}_M(t)$ , puis on calcule leur différence  $\Delta\hat{A}(t) = \hat{A}_M(t) - \hat{A}_B(t)$ . Cette différence  $\Delta\hat{A}(t)$  est comparée à la différence  $\Delta A(t) = \Delta A_M(t) - A_B(t)$  entre les traces base et monitor mesurées. La différence  $\Delta\hat{A}(t) - \Delta A(t)$  est minimisée en fonction des hypothèses de variation  $\Delta V_P/V_P$ ,  $\Delta\rho/\rho$  afin de sélectionner l'hypothèse qui rend compte au mieux de l'évolution de la trace sismique. L'optimisation peut consister à balayer un grand nombre d'hypothèses  $\Delta V_P/V_P$ ,  $\Delta\rho/\rho$  et à retenir celle qui fournit la plus petite valeur moyenne de  $|\Delta\hat{A}(t) - \Delta A(t)|$  ou  $[\Delta\hat{A}(t) - \Delta A(t)]^2$ , ou qui minimise une autre mesure de distance entre  $\Delta\hat{A}(t)$  et  $\Delta A(t)$ . Une autre possibilité est de sélectionner une hypothèse  $\Delta V_P/V_P$ ,  $\Delta\rho/\rho$  dès lors que la moyenne temporelle de  $|\Delta\hat{A}(t) - \Delta A(t)|$  est inférieure à un seuil prédéfini.

[0033] Divers algorithmes de minimisation peuvent être appliqués, par exemple des algorithmes génétiques ou de recuit simulé, qui ne nécessitent pas de calcul de gradients et ne se trouvent pas piégés dans des minima locaux.

[0034] La fonction coût  $|\Delta\hat{A} - \Delta A|$  n'est pas nécessairement la meilleure pour réaliser l'optimisation dans la mesure où la trace base synthétique a souvent une allure assez différente de la trace base mesurée. En pratique, il est souvent plus approprié de transformer l'une des traces mesurées dans le référentiel de l'autre trace pour chaque hypothèse de variation avant de procéder à un calcul de distance entre ces deux traces.

[0035] Un tel mode de réalisation est illustré par la figure 5, où on voit en partie gauche des logs  $V_P(t)$ ,  $\rho(t)$  en fonction du temps et une hypothèse  $\Delta V_P/V_P$ ,  $\Delta\rho/\rho$  de variation des paramètres dans les couches perméables 20, 30. La figure 5 montre également une trace sismique base  $A_B(t)$  mesurée avant la mise en production du puits.

[0036] A partir des logs  $V_P(z)$  et  $\rho(z)$  et des hypothèses de variation  $\Delta V_P/V_P$ ,  $\Delta\rho/\rho$ , une trace synthétique base  $\hat{A}_B(t)$  et une trace synthétique monitor base  $\hat{A}_M(t)$  sont calculées en appliquant les formules (2) et (3) ci-

dessus. Toutefois, avant d'appliquer la formule (3), on utilise la loi de conversion profondeur-temps applicable au temps base (courbe 15 sur le diagramme  $z, t$  de la figure 5) pour convertir les valeurs  $V_P(z) \cdot [1 + \frac{\Delta V_P}{V_P}(z)]$ ,

$\rho(z) \cdot [1 + \frac{\Delta \rho}{\rho}(z)]$  exprimées en fonction de la profondeur en valeurs

5  $V_P(t) \cdot [1 + \frac{\Delta V_P}{V_P}(t)]$ ,  $\rho(t) \cdot [1 + \frac{\Delta \rho}{\rho}(t)]$  exprimées en fonction du temps de

propagation. La différence  $\Delta \hat{A}(t) = \hat{A}_M(t) - \hat{A}_B(t)$  entre les deux traces synthétiques est alors calculée dans le référentiel temporel de la base. Cette différence  $\Delta \hat{A}(t)$  est alors ajoutée à la trace sismique base mesurée  $A_B(t)$  pour obtenir une première pseudo-trace monitor  $A'_M(t)$  représentée sur la figure 5:

10  $A'_M(t) = A_B(t) + \Delta \hat{A}(t)$ .

[0037] Cette pseudo-trace  $A'_M(t)$  est exprimée dans le référentiel temporel du temps base. L'échelle de temps doit être modifiée pour ramener la pseudo-trace dans le référentiel temporel du temps monitor et obtenir ainsi une deuxième pseudo-trace  $A''_M(t)$  représentée en partie droite de la figure 5. Le

15 changement d'échelle temporelle est effectué de manière à compenser la différence entre la loi de conversion profondeur-temps applicable au temps base (courbe 15) et la loi de conversion profondeur-temps applicable au temps monitor (courbe 16).

[0038] Dans le mode de réalisation de la figure 5, l'optimisation utilise une

20 fonction coût donnée par la différence entre la trace sismique monitor mesurée  $A_M(t)$  et la pseudo-trace sismique  $A''_M(t)$  calculée de la manière précédemment décrite, par exemple la somme des carrés ou la somme des valeurs absolues de cette différence.

[0039] Il doit être observé qu'il existe plusieurs manières de ramener l'une

25 des traces dans le référentiel de l'autre en tenant compte d'une hypothèse de variation des paramètres afin de réaliser l'optimisation. Un mode de réalisation avantageux part de la trace sismique monitor mesurée pour la ramener dans le référentiel de la trace sismique base. En particulier, on peut commencer par

modifier l'échelle temporelle de la trace sismique monitor mesurée  $A_M(t)$  pour la ramener à l'échelle applicable au temps base (compensation de la différence entre les courbes 15 et 16). Ensuite, on soustrait de la pseudo-trace obtenue la différence  $\Delta\hat{A}(t)$  calculée comme précédemment pour obtenir une pseudo-trace  $A''_B(t)$  exprimée dans le référentiel temporel associé au temps base. La fonction coût intervenant dans l'optimisation est alors donnée par la différence entre cette pseudo-trace  $A''_B(t)$  et la trace sismique base mesurée  $A_B(t)$ .

[0040] La figure 6 illustre une variante de réalisation mettant en œuvre une méthode approchée inspirée de celle de la figure 5. Dans cette méthode approchée, il n'est pas pris en considération de log mesuré. En conséquence, cette méthode est applicable indépendamment d'un puits. Elle est notamment applicable pour rechercher l'évolution des paramètres  $V_P$ ,  $\rho$  dans des couches géologiques dont le positionnement le long d'une direction typiquement verticale est déterminé en fonction de la grille réservoir déterminée pour l'exploitation de la zone considérée.

[0041] Dans la méthode illustrée par la figure 6, la modification  $\Delta\hat{A}(t)$  de la trace sismique base exprimée dans le référentiel du temps base n'est pas calculée à partir de logs mesurés à l'aide des formules (2) et (3) ci-dessus. Elle est exprimée directement en fonction de la variation d'impédance  $\Delta I_P/I_P$  correspondant à l'hypothèse de variation de la vitesse de propagation  $V_P$  et de la densité  $\rho$ :

$$\Delta I_P/I_P \approx \Delta V_P/V_P + \Delta \rho/\rho \quad (4)$$

[0042] La variation relative d'amplitude  $\Delta\hat{A}/A$  est estimée de manière approchée comme étant proportionnelle à la variation relative d'impédance  $\Delta I_P/I_P$ , le coefficient de proportionnalité étant l'amplitude de l'ondelette  $w(t)$  représentant le signal sismique incident.

[0043] A partir de la perturbation  $\Delta\hat{A}(t)$  calculée de manière approximative, la méthode illustrée par la figure 6 poursuit en calculant une première pseudo-trace monitor  $A'_M(t) = A_B(t) + \Delta\hat{A}(t)$ . Comme dans la méthode illustrée par la

figure 5, une deuxième pseudo-trace  $A''_M(t)$  est calculée par changement d'échelle temporelle pour être comparée à la trace sismique monitor mesurée  $A_M(t)$ . Le résultat de la comparaison sert alors de fonction coût pour l'optimisation.

- 5 [0044] Sur la figure 6, la trace 18 représentée en pointillés correspond à la première pseudo-trace  $A'_M(t)$  calculée sans approximation de la manière décrite en référence à la figure 5. On voit que la pseudo-trace approchée diffère légèrement de celle-ci auprès des bords des couches perméables.

- [0045] Dans le cas où les ondes sismiques sont envoyées sous incidence  
10 normale vers les couches étudiées et sont recueillies sans décalage latéral (offset) significatif entre la source 11 et le détecteur 12, la vitesse de propagation des ondes de pression  $V_P$  et la densité  $\rho$  suffisent à modéliser la propagation des ondes captées par le détecteur 12.

- [0046] Le procédé décrit ci-dessus est également applicable dans le cas où  
15 un offset existe entre la source 11 et le détecteur 12 comme représenté sur la figure 7.

- [0047] Dans ce dernier cas, la variation d'impédance  $\Delta I_P/I_P$  intervenant dans la méthode approchée illustrée par la figure 6 dépend également de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement  $V_S$  par l'intermédiaire de  
20 l'angle  $\theta$  d'incidence de l'onde sur l'interface:

$$\Delta I_P/I_P = \Delta \rho/\rho + [\Delta V_P/V_P]/\cos^2\theta - (2V_S/V_P)^2 \cdot [2\Delta V_S/V_S + \Delta \rho/\rho] \cdot \sin^2\theta \quad (5)$$

- [0048] On voit alors qu'il est possible d'inclure la vitesse  $V_S$  de propagation des ondes de cisaillement dans les paramètres élastiques pris en compte dans les hypothèses de variation. Le procédé donne donc accès à des estimations  
25 de la vitesse  $V_S$ . Une possibilité est d'évaluer  $V_P$  et  $\rho$  dans une première étape à partir de traces sismiques enregistrées sous incidence normale (figure 1), et de faire ensuite des hypothèses de variation du seul paramètres  $V_S$  pour réaliser l'optimisation en fonction de ce paramètre dans une deuxième étape à partir de traces sismiques enregistrées avec offset.

[0049] Le procédé décrit ci-dessus dans différents modes de réalisation tire parti d'informations géophysiques (les traces sismiques) et d'information communément disponibles aux ingénieurs réservoirs (la modélisation en couches du sous-sol). Elle procure un nouveau mode d'analyse des données sismiques 4D permettant de prendre en compte des informations a priori sur le comportement géologique et dynamique de la zone étudiée.

[0050] On comprendra que l'invention n'est pas limitée aux modes de réalisation particuliers qui ont été décrits ci-dessus, de nombreuses variantes pouvant être conçues sans sortir de la portée définie par les revendications jointes.

## REVENDICATIONS

1. Procédé d'estimation de paramètres élastiques d'une région du sous-sol, comprenant:
  - mesurer au moins une trace sismique base en un premier temps;
  - 5 - mesurer, en un deuxième temps, au moins une trace sismique monitor correspondant à la trace sismique base;
  - faire des hypothèses de variation de paramètres élastiques dans des couches perméables de positions prédéfinies le long d'une direction entre le premier et le deuxième temps, les paramètres élastiques incluant la
  - 10 densité ( $\rho$ ) et la vitesse de propagation des ondes de pression ( $V_P$ ) dans chacune desdites couches perméables;
  - évaluer numériquement une capacité de chaque hypothèse de variation de paramètres élastiques à rendre compte d'une évolution entre la trace sismique base mesurée et la trace sismique monitor mesurée;
  - 15 - estimer la variation des paramètres élastiques conformément à une hypothèse ayant une capacité évaluée optimale.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les traces sismiques base et monitor sont mesurées en envoyant des ondes sismiques sous incidence normale vers des couches se succédant le long de ladite direction et
- 20 en recueillant les ondes sismiques réfléchies par des interfaces entre lesdites couches.
3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les traces sismiques base et monitor sont mesurées en envoyant des ondes sismiques sous incidence non normale vers des couches se succédant le long de ladite
- 25 direction et en recueillant les ondes sismiques réfléchies par les interfaces entre lesdites couches, et dans lequel les paramètres élastiques incluent en outre la vitesse de propagation des ondes de cisaillement ( $V_S$ ) dans les couches perméables le long de ladite direction.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel les paramètres élastiques incluent en outre la position, le long de ladite direction, d'au moins une interface délimitant l'une desdites couches perméables.
- 5 5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel les variations de paramètres élastiques sont prises en compte dans des couches perméables le long d'un puits (10) foré dans le sous-sol.
6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel les positions des couches perméables le long du puits (10) sont définies à partir de mesures  
10 effectuées dans le puits.
7. Procédé selon la revendication 5, dans lequel les positions des couches perméables le long du puits (10) sont définies à partir de positions de percements réalisés dans un tubage du puits.
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 5 à 7, dans  
15 lequel l'évaluation numérique de la capacité d'une hypothèse de variation de paramètres élastiques à rendre compte de l'évolution entre la trace sismique base mesurée et la trace sismique monitor mesurée comprend:
- calculer une trace sismique base simulée à partir d'une ondelette représentative d'un signal sismique incident et de valeurs des paramètres  
20 élastiques mesurées au niveau du puits (10) dans le premier temps;
  - obtenir des valeurs des paramètres élastiques au niveau du puits pour le deuxième temps à partir des valeurs mesurées au niveau du puits dans le premier temps et de ladite hypothèse de variation;
  - calculer une trace sismique monitor simulée à partir de ladite ondelette et  
25 des valeurs des paramètres élastiques au niveau du puits obtenues pour le deuxième temps; et
  - comparer la différence entre la trace sismique monitor mesurée et la trace sismique base mesurée à la différence entre la trace sismique monitor simulée et la trace sismique base simulée.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 5 à 7, dans lequel l'évaluation numérique de la capacité d'une hypothèse de variation de paramètres élastiques à rendre compte de l'évolution entre la trace sismique base mesurée et la trace sismique monitor mesurée comprend:

- 5       - obtenir des valeurs des paramètres élastiques au niveau du puits (10) pour le deuxième temps à partir de valeurs des paramètres élastiques mesurées au niveau du puits dans le premier temps et de ladite hypothèse de variation;
- estimer une perturbation en amplitude de la trace sismique base  
10       mesurée par suite d'un passage des paramètres élastiques au niveau du puits des valeurs mesurées dans le premier temps aux valeurs obtenues pour le deuxième temps;
- calculer une pseudo-trace sismique en combinant l'une des traces sismiques mesurées avec la perturbation en amplitude estimée; et
- 15       - comparer, sur une même échelle de temps, l'autre des traces sismiques mesurées à la pseudo-trace sismique calculée.

10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel l'estimation de la perturbation en amplitude comprend:

- calculer une trace sismique base simulée à partir d'une ondelette  
20       représentative d'un signal sismique incident et des valeurs des paramètres élastiques mesurées au niveau du puits (10) dans le premier temps;
- calculer une trace sismique monitor simulée à partir de ladite ondelette et des valeurs des paramètres élastiques au niveau du puits obtenues pour  
25       le deuxième temps, les traces sismiques base et monitor simulées étant calculées avec une même loi de conversion profondeur-temps; et
- soustraire la trace sismique base simulée de la trace sismique monitor simulée pour obtenir la perturbation en amplitude estimée.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans  
30 lequel l'évaluation numérique de la capacité d'une hypothèse de variation des

paramètres élastiques à rendre compte de l'évolution entre la trace sismique base mesurée et la trace sismique monitor mesurée comprend:

- estimer une perturbation en amplitude de la trace sismique base mesurée par suite de la variation des paramètres élastiques;
- 5       - calculer une pseudo-trace sismique en combinant l'une des traces sismiques mesurées avec la perturbation en amplitude estimée; et
- comparer, sur une même échelle de temps, l'autre des traces sismiques mesurées à la pseudo-trace sismique calculée.

12.       Procédé selon la revendication 11, dans lequel la perturbation en  
10       amplitude est estimée en fonction de variations d'impédance dans lesdites couches perméables, déduites de l'hypothèse de variation des paramètres élastiques, et d'une ondelette représentative d'un signal sismique incident.

13.       Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 12, dans lequel la trace sismique mesurée combinée avec la perturbation en amplitude  
15       estimée pour le calcul de la pseudo-trace sismique est la trace sismique monitor mesurée, la combinaison comprenant:

- modifier l'échelle de temps de la trace sismique monitor mesurée pour tenir compte de la variation de vitesse de propagation des ondes sismiques conforme à l'hypothèse de variation de paramètres élastiques;
- 20       et
- soustraire la perturbation en amplitude estimée de la trace sismique monitor mesurée modifiée.

14.       Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans lequel les positions des couches perméables le long de ladite direction sont  
25       définies à partir d'une grille réservoir.

1/6

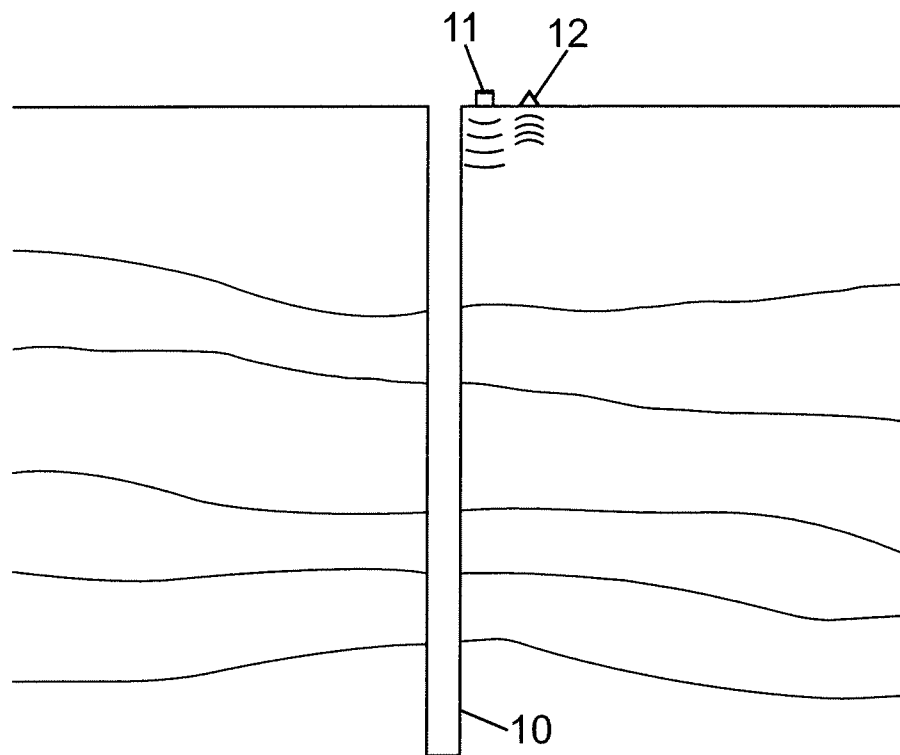


FIG. 1

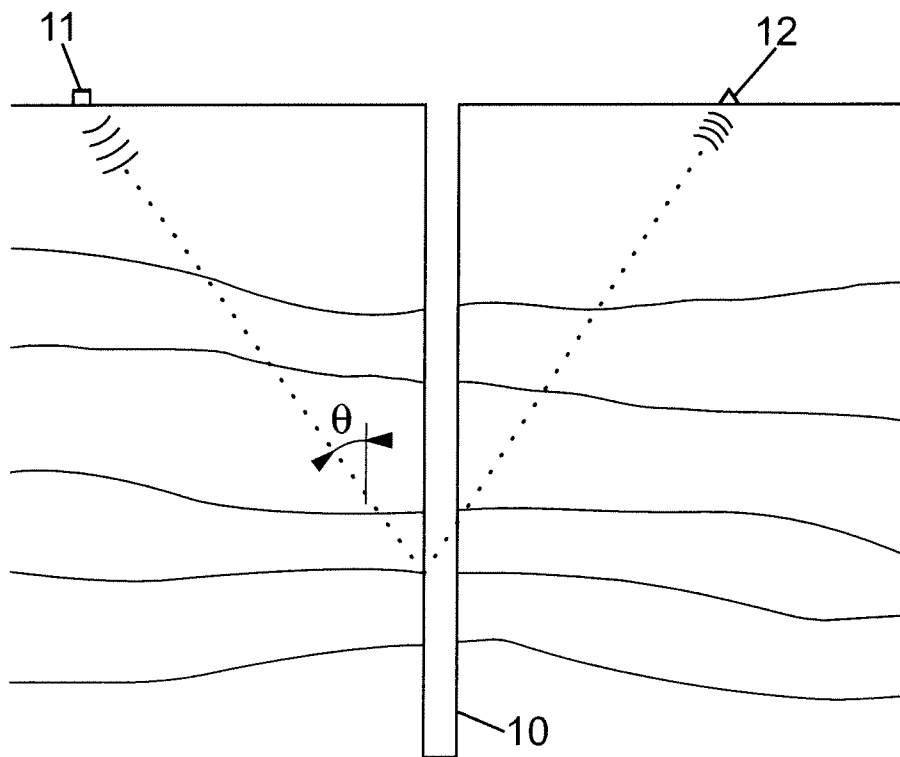
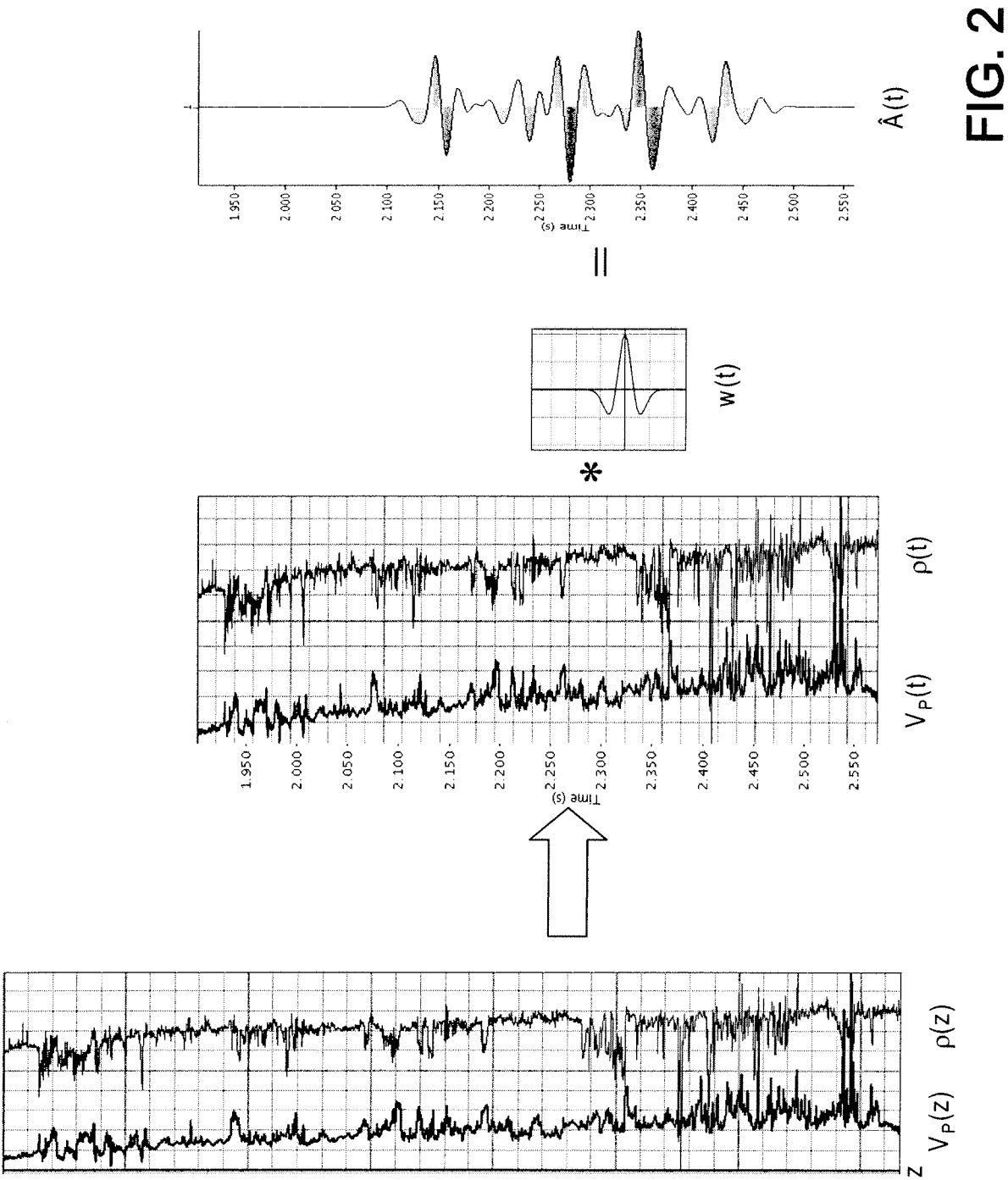


FIG. 7



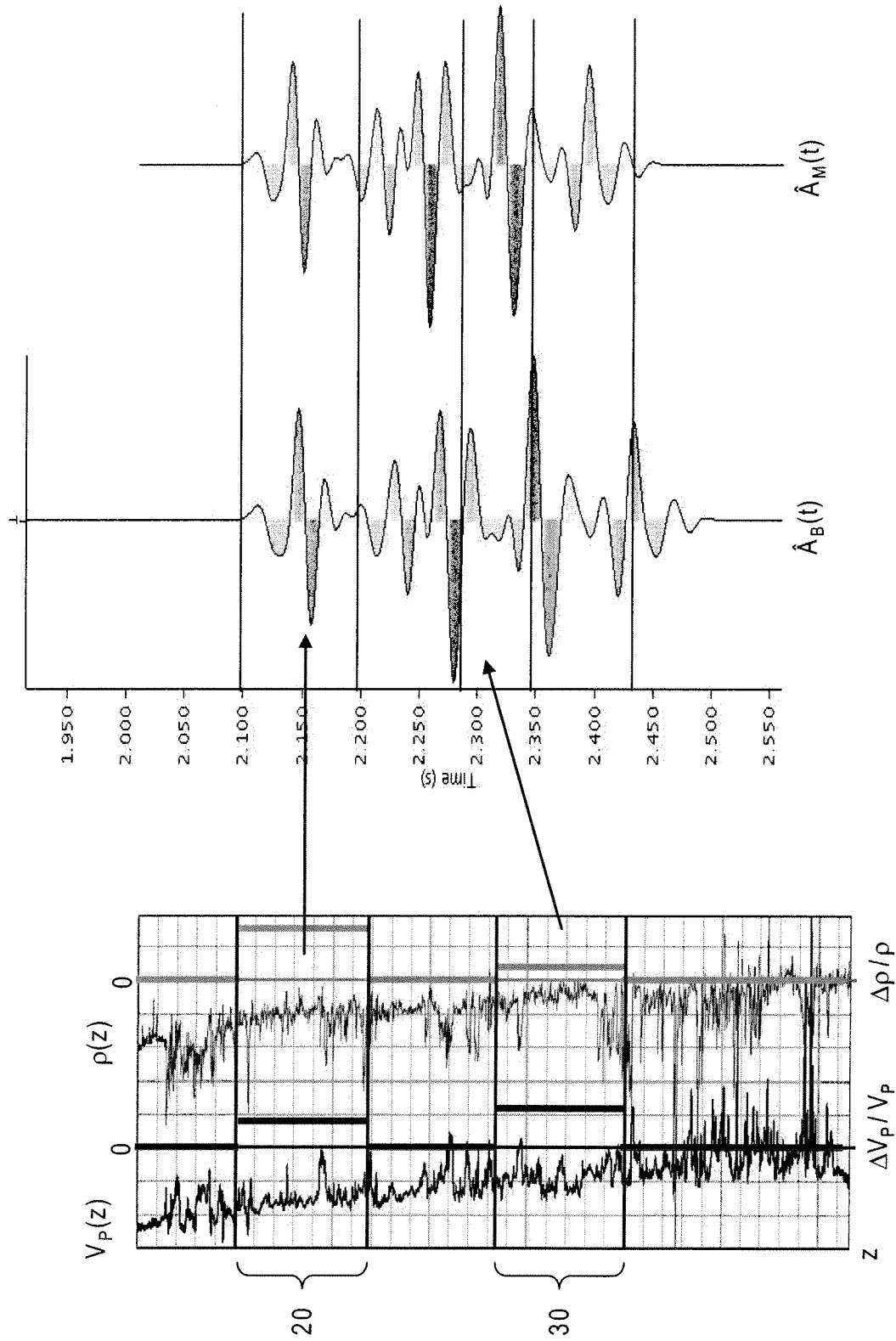


FIG. 3

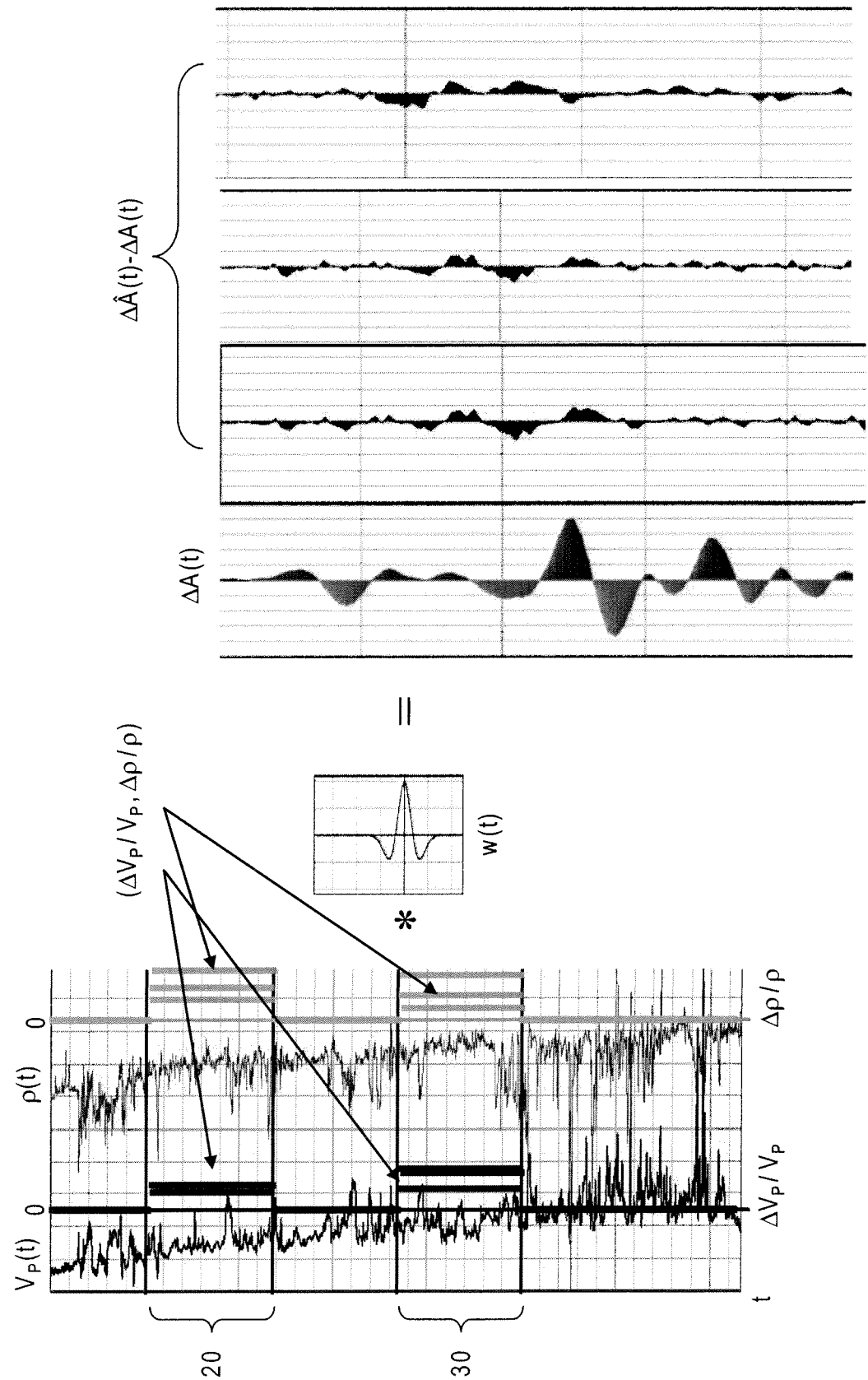


FIG. 4

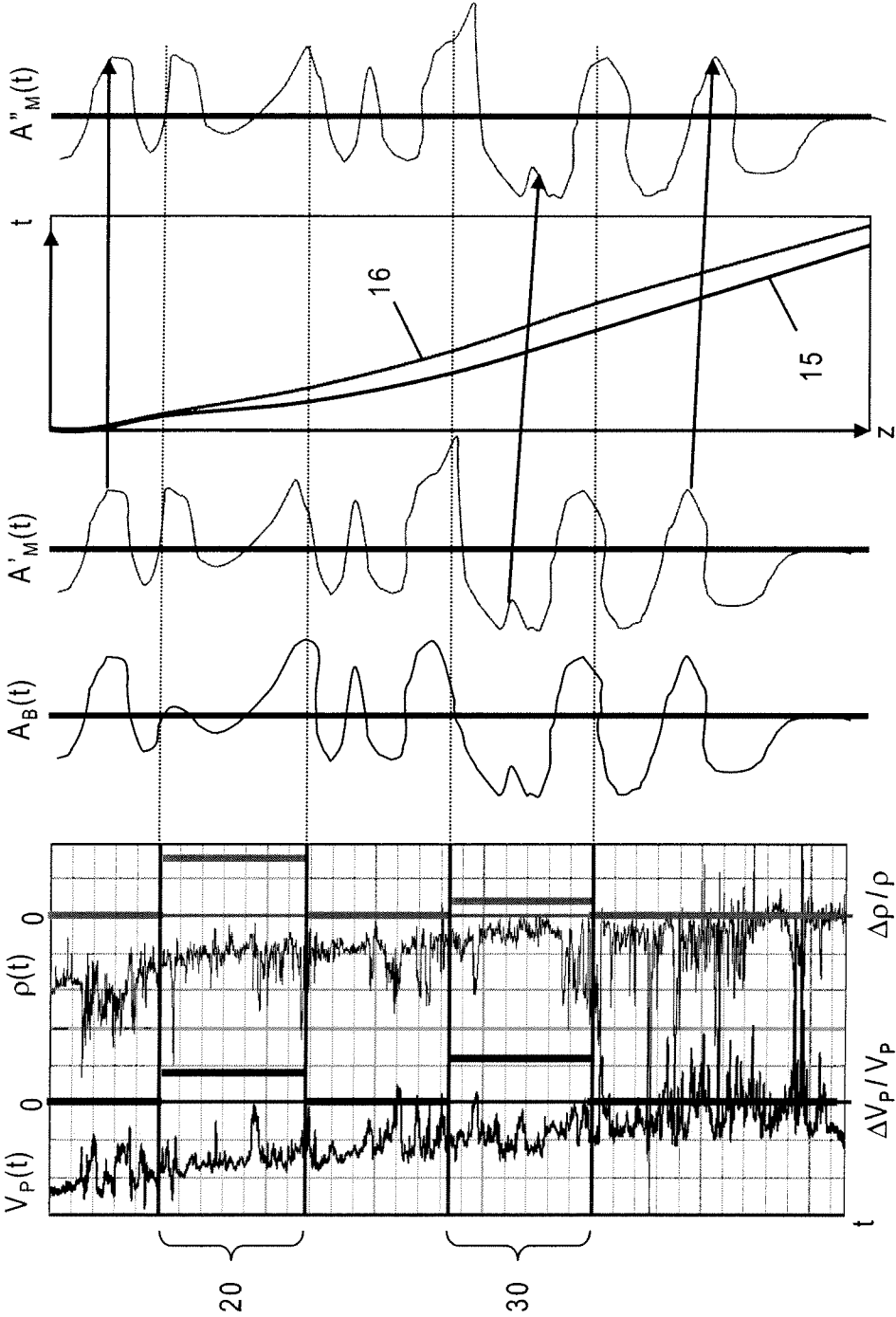


FIG. 5

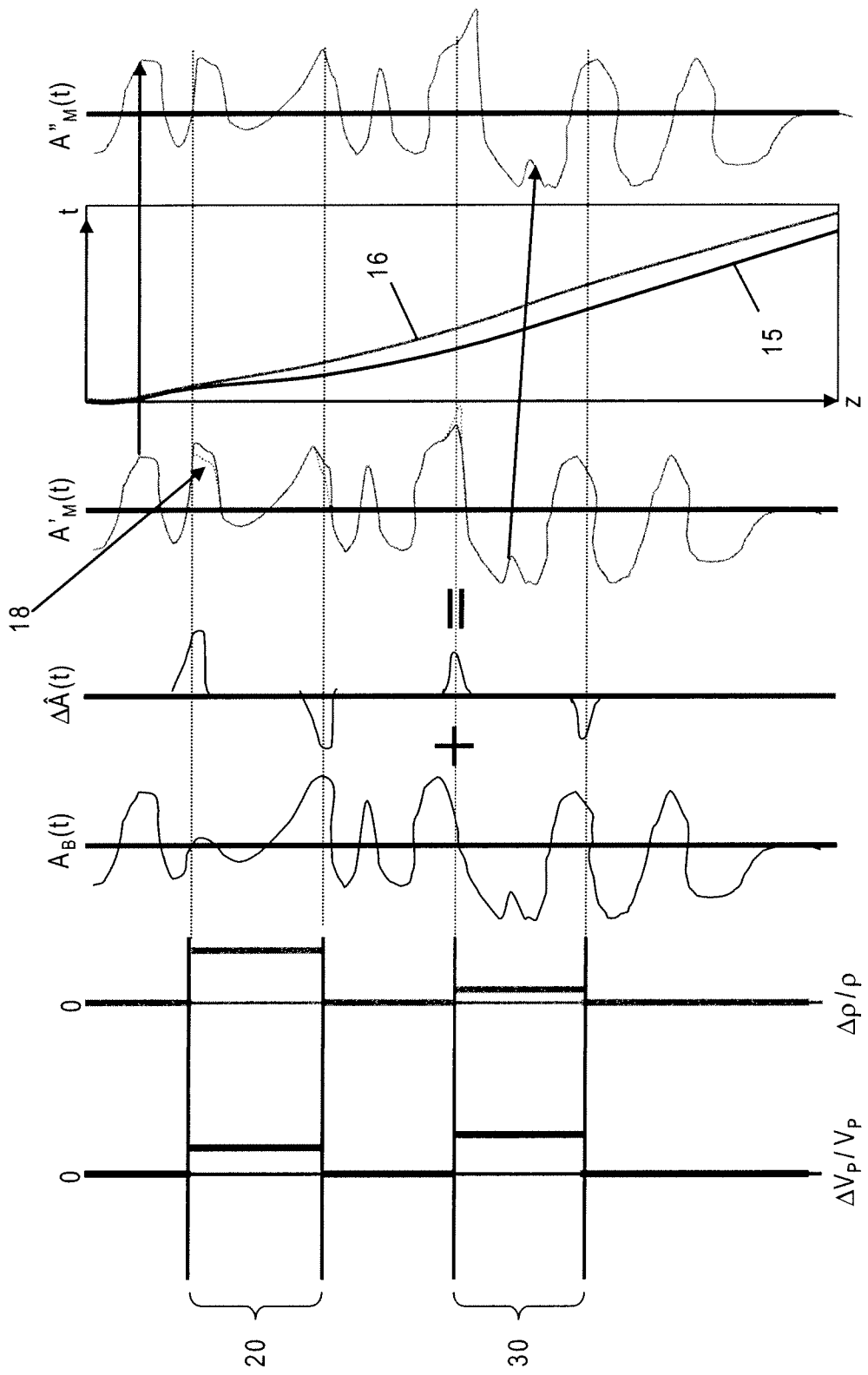


FIG. 6