

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
13 décembre 2012 (13.12.2012)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2012/168614 A2

(51) Classification internationale des brevets :
E21B 49/00 (2006.01) *E21B 49/08* (2006.01)
E21B 34/02 (2006.01) *E21B 47/06* (2012.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2012/051157

(22) Date de dépôt international :
23 mai 2012 (23.05.2012)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1155105 10 juin 2011 (10.06.2011) FR

(72) Inventeur ; et

(71) Déposant : DESPAX, Damien [FR/FR]; Le Bastidon -,
21 Traverse du Lavoir de Grand-Mère, F-13100 Aix-en-
provence (FR).

(74) Mandataire : CABINET BEAUMONT; 1, Rue Cham-
pollion, F-38000 Grenoble (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, QA, RO, RS, RU, RW, 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.

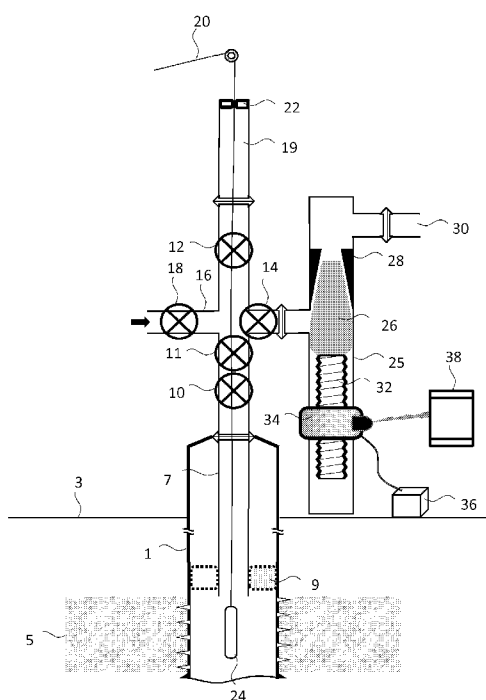
(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ,
UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,
TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,
EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, 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).

Publiée :

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

(54) Title : METHOD FOR DETERMINING THE COMPLEX RESPONSE OF A PERMEABLE STRATUM

(54) Titre : PROCEDE DE DETERMINATION DE LA REPONSE COMPLEXE D'UNE STRATE PERMEABLE



(57) Abstract : The invention relates to a method for determining the complex response of a permeable stratum at the bottom of a producing well, the well comprising a well head fitted with an outlet valve and the bottom of the well comprising a height-adjustable pressure and flow rate sensor (24), comprising the following steps: Periodically altering the degree to which the outlet valve is open, and, while the alteration is in progress: - measuring the pressure and flow rate in the well at the top/bottom of the stratum for a certain number of periods of alteration, after a certain delay; and - measuring the pressure and the flow rate in the well at the bottom/top of the stratum for a certain number of periods of alteration, immediately after the positioning of the sensor.

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé de détermination de la réponse complexe d'une strate perméable au fond d'un puits en exploitation, le puits comprenant une tête de puits équipée d'une vanne de sortie et le fond du puits comprenant une sonde (24) de mesure de pression et de débit réglable en hauteur, comprenant les étapes suivantes: moduler de façon périodique le degré d'ouverture de la vanne de sortie et, tandis que la modulation est en cours : -mesurer la pression et le débit dans le puits en haut/bas de la strate pendant un certain nombre de périodes de modulation, après un certain retard; et -mesurer la pression et le débit dans le puits en bas/haut de la strate pendant un certain nombre de périodes de modulation, immédiatement après mise en place de la sonde..

**PROCEDE DE DETERMINATION DE LA REPONSE COMPLEXE D'UNE STRATE
PERMEABLE**

Domaine de l'invention

La présente invention concerne des procédés et dispositifs de détermination du potentiel hydraulique d'une strate perméable et poreuse au fond d'un puits afin d'évaluer la
5 qualité de production d'un gisement notamment de pétrole. On appelle ici "strate" toute partie d'un gisement d'où provient un effluent, débouchant dans un puits à l'intérieur d'un intervalle continu de hauteur inférieure ou égale à l'épaisseur totale du gisement.

10 Exposé de l'art antérieur

Ce problème a déjà été traité par le présent inventeur dans la demande de brevet français 2 678 679 du 5 juillet 1991, dans la demande de brevet français 2 817 587 du 4 décembre 2000 et dans le brevet US 7 257 491 sous priorité du 22 mai 2002.

15 Dans la demande de brevet français 2 678 679, on prévoit de descendre au fond d'un puits, au niveau d'une strate productrice d'effluent, un dispositif comprenant d'une part une sonde de pression et de débit, d'autre part un moyen d'obturation au moins partiel du débit du puits. Le dispositif est mis
20 en place à des profondeurs successives du gisement. Pour chaque profondeur, l'obturateur est mis de façon périodique en position

de non-obturation et en position d'obturation au moins partielle, les variations de pression et de débit résultantes sont mesurées et on en déduit diverses caractéristiques du gisement et notamment la perméabilité de la ou des strates perméables ainsi que l'éventuel colmatage du puits.

Dans la demande de brevet français 2 817 587, le même dispositif est utilisé et des procédés sont décrits pour déterminer plus particulièrement le colmatage du puits (SKIN). Si on détecte un colmatage, divers moyens sont utilisés pour décolmater les parois du puits.

Le brevet US 7 257 491 décrit un procédé d'évaluation de la réponse complexe d'une strate. Cette réponse, R_{stratum} , est définie comme étant une valeur complexe correspondant au rapport entre les variations de pression, P , et les variations de débit, Q , mesurées au niveau de la paroi du puits, résultant de la modulation. Le brevet US indique que la réponse R_{stratum} de la strate perméable comprise entre une cote haute (high) et une cote basse (low), correspond à la formule $1/R_{\text{stratum}} = 1/R_{\text{high}} - 1/R_{\text{low}}$. De plus, ce brevet indique brièvement que la modulation de pression et de débit dans le puits peut résulter d'une action effectuée ou bien, comme dans les demandes de brevets antérieures, à partir d'un obturateur disposé en fond de puits, ou bien à partir de la surface. Dans ce deuxième cas, on propose plus particulièrement d'agir sur une injection de fluide par une pompe disposée au niveau de la surface du puits. Toutefois, ce brevet n'indique pas d'intérêt particulier à produire une modulation à partir de la surface ou à partir du fond du puits.

Le brevet US 7 257 491 propose également de moduler la fermeture de la sortie du puits, c'est-à-dire de fermer cette sortie de façon périodique (et non plus de façon continue comme dans les techniques antérieures aux trois brevets et demandes de brevet susmentionnés). Ceci entraîne un risque de désamorçage du puits lorsque la pression du gisement est suffisamment faible pour qu'il ne soit plus artésien.

Ainsi, un problème se pose pour obtenir de façon relativement simple une modulation de débit et de pression en fond de puits.

Un autre problème, non évoqué précédemment, réside dans l'obtention de paramètres caractéristiques rigoureux à partir de mesures de débit et de pression réalisées en fond de puits.

Résumé de l'invention

Ainsi, un objet d'un mode de réalisation de la présente invention est de prévoir un dispositif et un procédé de mesure de pression et de débit en fond de puits, en fonction d'une modulation appliquée de façon simple à la pression et au débit du puits.

Un autre objet d'un mode de réalisation de la présente invention est de prévoir un procédé fournissant une détermination exacte de divers paramètres relatifs à la série de strates du gisement, et notamment leur réponse complexe individuelle R_{strate} , à partir de mesures de débit et de pression effectuées à diverses hauteurs dans le fond du puits au droit du gisement.

Pour atteindre ces objets ainsi que d'autres, un mode de réalisation de la présente invention prévoit un procédé de détermination de la réponse complexe d'une strate perméable au fond d'un puits en exploitation, le puits comprenant une tête de puits équipée d'une vanne de sortie et le fond du puits comprenant une sonde de mesure de pression et de débit réglable en hauteur, comprenant les étapes suivantes :

moduler de façon périodique le degré d'ouverture de la vanne de sortie et, tandis que la modulation est en cours :

- mesurer la pression et le débit dans le puits en haut/bas de la strate pendant un certain nombre de périodes de modulation, après un certain retard ; et

- mesurer la pression et le débit dans le puits en bas/haut de la strate pendant un certain nombre de périodes de modulation, immédiatement après mise en place de la sonde.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, les étapes de mesures sont répétées pour d'autres strates immédiatement après mise en place de la sonde en haut/bas de ces autres strates.

5 Selon un mode de réalisation de la présente invention, la modulation modifie le débit de sortie de 5 à 15%.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, la modulation comporte une superposition de plusieurs périodes de modulation.

10 Selon un mode de réalisation de la présente invention, la superposition de périodes comporte des périodes présentant entre elles des rapports égaux à des puissances entières de 2.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, on détermine la réponse complexe R_{strate} de la strate :

15 - en mesurant et/ou en calculant au préalable les valeurs de :

la pression ponctuelle $p(z)$ en régime stabilisé mesurée dans le puits à la profondeur z dirigée vers le fond du puits, l'origine étant prise au niveau du toit de la strate,

20 la pulsation ω de la modulation,

la longueur L du puits entre le toit et le mur de la strate,

la compressibilité c de l'effluent dans le tubage,

la masse volumique moyenne ρ de l'effluent circulant dans le puits entre le mur et le toit de la strate,

25 la masse volumique ρ_{strate} de l'effluent produit par la strate,

le coefficient de pertes de charge tangent linéarisé dans le tubage $F = \delta^2 p / \delta q \cdot \delta z$,

l'aire s de la section droite du puits,

le débit ponctuel en régime stabilisé $q(z)$ mesuré dans le puits à la profondeur z ,

30 la pression complexe ponctuelle $P(z) = \Delta P(z) \cdot e^{i(\omega \cdot t + \phi(z))}$ de la modulation mesurée dans le puits à la profondeur z ,

le débit complexe ponctuel $Q(z) = \Delta Q(z) \cdot e^{i(\omega \cdot t + \psi(z))}$ de la modulation,

le facteur d'emmagasinement $\Delta C = c \cdot s \cdot L$ d'un tronçon de puits de longueur L , et

35

- en appliquant la relation suivante :

$$\frac{1}{R_{\text{strate}}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{strate}}} \cdot (X - i \cdot \omega \cdot \Delta C),$$

où X est une grandeur complexe solution de l'équation implicite suivante :

$$X = \frac{\left(F + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho}{s} \right) \cdot L \cdot U(X)}{R_h \cdot R_b \cdot U(X) - (R_b - R_h)},$$

dans laquelle, pour commodité d'écriture, l'expression U(X) figure le groupe de termes complexes suivant :

$$U(X) = X \cdot \frac{\text{th} \left[\sqrt{\left(F + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho}{s} \right) \cdot L \cdot X} \right]}{\sqrt{\left(F + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho}{s} \right) \cdot L \cdot X}}.$$

Selon un mode de réalisation de la présente invention,
10 le débitmètre de la sonde est étalonné en appliquant les étapes suivantes :

- placer la sonde à une position correspondant à la limite supérieure du gisement,
- mesurer le débit à la sortie du puits, et
- 15 - fixer que la valeur fournie par le débitmètre de la sonde est la valeur mesurée en sortie.

Brève description des dessins

Ces objets, caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres seront exposés en détail dans la description suivante
20 de modes de réalisation particuliers faite à titre non-limitatif en relation avec la figure 1 qui représente de façon schématique un exemple d'installation de puits de pétrole.

Description détaillée

La présente description est faite plus particulière-
25 ment dans le cas où le puits considéré est un puits d'extraction de pétrole ou de gaz. Toutefois, elle s'appliquera généralement à tout type de puits en exploitation.

1. DISPOSITIF ET PROCEDE DE MESURE

La figure 1 représente de façon très schématique des éléments essentiels d'un tel puits. Le puits est délimité par un tubage (souvent désigné par l'appellation anglo-saxonne casing) 1 qui s'étend à partir d'un niveau légèrement supérieur au niveau du sol 3 jusqu'à pénétrer dans un gisement 5 perméable et producteur d'effluent au niveau duquel le tubage est perforé. A l'intérieur du tubage 1 s'étend une conduite de production (souvent désignée par l'appellation anglo-saxonne tubing) 7 qui s'étend au-dessus du niveau du tubage et qui s'arrête au niveau d'un obturateur de production 9 mis en place sensiblement au niveau du toit du gisement. Ce gisement est essentiellement constitué d'une série de strates poreuses et perméables à travers lesquelles chemine un effluent, dans le cas considéré ici du pétrole ou un gaz, qui pénètre dans le puits et remonte dans la conduite de production 7.

La partie supérieure de la conduite de production ou tête de puits, comprend un ensemble de vannes, généralement deux premières vannes d'arrêt 10 et 11 qui sont ouvertes quand le puits est en exploitation et une vanne d'arrêt supérieure 12. Un tube de sortie s'étend à partir de la conduite de production entre les vannes 11 et 12 et est commandé par une vanne de production 14 par laquelle sort l'effluent quand le puits est en production. Un tube 16 est également relié à la conduite de production entre les vannes 11 et 12. Un fluide sous pression peut être injecté dans le tube 16, par l'intermédiaire d'une vanne de pompe 18.

Un câble 20 pénètre dans le tube d'exploitation par l'intermédiaire d'un sas 19 fermé par un presse-étoupe 22 et porte à sa partie inférieure une sonde 24 de mesure de pression et de débit (souvent désignée par le sigle PLT, de l'appellation anglo-saxonne Production Logging Tool), par exemple du type décrit dans les documents susmentionnés du même inventeur. Cette sonde permet éventuellement de mesurer d'autres paramètres, tels que la température et les gradients de pression.

Le câble 20 a une fonction mécanique de support de la sonde et une fonction électrique d'échange de signaux entre la sonde et un dispositif de commande, de mesure et d'alimentation non représenté.

5 Il est prévu ici d'adjoindre à la vanne d'arrêt de production 14 une vanne de sortie réglable 25, par exemple du type vanne pointeau. Cette vanne comprend un pointeau conique 26 susceptible de venir obturer un siège conique 28 pour laisser
10 sortir un débit d'effluent choisi par une sortie 30. Le pointeau 26 est par exemple solidaire d'une vis sans fin 32 coopérant avec un moteur 34 alimenté par une alimentation 36 commandée, éventuellement à distance, à partir d'un ordinateur de chantier 38.

Lorsque le puits est en production, et que les vannes
15 10, 11 et 14 sont ouvertes, il est prévu de commander la vanne pointeau en position ouverte, pour moduler le débit de l'effluent de façon périodique. Cette modulation agira, par exemple, pour assurer une variation périodique, sinusoïdale ou non, par exemple, de l'ordre de 5 à 15 %, par exemple 10 %, du
20 débit.

Avec ce système, la périodicité de la modulation peut être choisie de façon extrêmement libre. On pourra choisir une période de modulation comprise entre quelques secondes et quelques heures. On pourra aussi choisir une superposition de
25 plusieurs périodes de modulation, par exemple une superposition de périodes présentant entre elles des rapports égaux à des puissances entières de 2.

Il résulte de cette modulation imposée au débit de sortie du puits, des variations de pression périodiques qui se
30 répercutent vers le fond du puits, au niveau du gisement 5. On effectue alors, tandis que la modulation est en cours, des mesures de pression et de débit au moyen de la sonde 24 pour plusieurs positions en hauteur de cette sonde. On peut en déduire la réponse complexe R_{strate} de la strate individualisée
35 par les deux positions de mesure et notamment, comme cela a été

exposé dans les documents susmentionnés de l'inventeur, en déduire la perméabilité de la strate productrice ainsi que son éventuel colmatage entre les positions de mesure.

Un avantage du système de modulation de débit/pression décrit ici est qu'il est particulièrement simple à mettre en oeuvre car il est réalisé au niveau de la tête de puits et non pas en fond de puits. De plus, il est beaucoup plus simple d'obtenir une modulation de débit/pression par le moyen décrit ci-dessus que, comme cela a été proposé précédemment, en injectant par une pompe un fluide en surpression au travers de la vanne 18.

Un autre avantage de la présente invention est que, pendant la mesure, le puits reste en exploitation, son débit étant seulement modulé de quelques pourcents.

Un autre avantage de la présente invention est que, pendant la mesure, la sortie de l'effluent n'est à aucun moment bloquée, ce qui risquerait de provoquer un désamorçage du puits dans certaines conditions.

Un autre avantage de la présente invention est de permettre d'accélérer la réalisation des mesures. De façon connue, les mesures ne sont possibles qu'une fois qu'un régime stabilisé de modulation de pression apparaît au fond du puits. Ce régime stabilisé ne s'établit qu'après un temps nécessaire à la disparition complète du régime d'écoulement transitoire qui naît spontanément lors du déclenchement de la modulation forcée du débit, soit après deux, voire trois, périodes de modulation. Ainsi, la première mesure ne peut être effectuée par la sonde 24 qu'après deux, voire trois, périodes mortes (et cette durée peut être particulièrement longue lorsque la périodicité des perturbations induites est élevée (par exemple plusieurs dizaines de minutes). Par contre, les mesures suivantes peuvent être effectuées à différentes profondeurs sans attendre la fin de nouvelles périodes mortes. Ceci n'est pas le cas si la modulation est établie comme cela a été proposé antérieurement

par un obturateur de fond de puits remis en route pour chaque nouvelle position de la sonde.

2. DETERMINATION DE LA REPONSE COMPLEXE R_{strate} D'UNE STRATE A PARTIR DE MESURES DE PRESSION ET DE DEBIT EN FOND DE PUIITS

5 Par ailleurs, la présente invention prévoit un procédé de détermination de la réponse complexe R_{strate} d'une strate à partir de mesures de pression et de débit plus précis que ceux décrits dans les documents antérieurs de l'inventeur. Dans ces documents antérieurs, et notamment dans le brevet américain
10 7 257 491, il est indiqué que la réponse complexe d'une strate à étudier entre une cote haute et une cote basse, correspond à la formule : $1/R_{stratum} = 1/R_{high} - 1/R_{low}$.

Ceci ne tient pas compte de divers paramètres correcteurs qui peuvent fausser sensiblement les résultats dans une
15 proportion pouvant aller jusqu'à 10 %.

On considère une strate productrice débitant dans un puits circulaire de section constante en régime stabilisé. À ce régime, on superpose une onde de modulation du débit de pulsation constante et puis, à l'aide d'une sonde de mesure, on
20 mesure la réponse ponctuelle complexe de l'effluent en deux points situés respectivement l'un au droit de la limite supérieure ou toit et l'autre au droit de la limite inférieure ou mur de la strate productrice supposée homogène. Pour déterminer la réponse complexe de cette strate à partir de ces
25 deux mesures, de la forme du puits et des propriétés physiques de l'effluent, on définit et on détermine d'abord les paramètres physiques suivants.

Notations

Dans ce qui suit, on désigne par :

30 t (s), le temps,
 z (m), la profondeur dirigée vers le fond du puits, l'origine étant prise au niveau du toit de la strate,
 $p(z)$ (Pa), la pression ponctuelle en régime stabilisé mesurée dans le puits à la profondeur z ,

ω (s^{-1}), la pulsation de la modulation,

L (m), la longueur du puits entre le toit et le mur de la strate,

c (Pa^{-1}), la compressibilité de l'effluent dans le tubage,

5 ρ ($kg.m^{-3}$), la masse volumique moyenne de l'effluent circulant dans le puits entre le mur et le toit de la strate,

ρ_{strate} ($kg.m^{-3}$), la masse volumique de l'effluent produit par la strate,

10 $F = \delta^2 p / \delta q . \delta z$ ($Pa.s.m^{-4}$), le coefficient de pertes de charge tangent linéarisé dans le tubage,

s (m^2), l'aire de la section droite du puits,

$q(z)$ ($m^3.s^{-1}$), le débit ponctuel en régime stabilisé mesuré dans le puits à la profondeur z ,

15 $P(z) = \Delta P(z) . e^{i(\omega \cdot t + \phi(z))}$ (Pa), la pression complexe ponctuelle de la modulation mesurée dans le puits à la profondeur z ,

$Q(z) = \Delta Q(z) . e^{i(\omega \cdot t + \psi(z))}$ ($m^3.s^{-1}$), le débit complexe ponctuel de la modulation,

$\Delta C = c.s.L$ ($m^3.Pa^{-1}$), le facteur d'emmagasinement d'un tronçon de puits de longueur L .

20 Dans ce qui suit, on marque d'un indice b la partie inférieure d'une zone de mesure située au droit du mur de la strate productrice ou en dessous et d'un indice h la partie supérieure d'une zone de mesure située au droit du toit de la strate productrice ou au-dessus.

25 De plus, on définit une grandeur complexe X comme la solution de l'équation implicite :

$$X = \frac{\left(F + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho}{s} \right) \cdot L \cdot U(X)}{R_h \cdot R_b \cdot U(X) - (R_b - R_h)} \quad (1)$$

dans laquelle, pour commodité d'écriture, l'expression $U(X)$ figure le groupe de termes complexes suivant :

30
$$U(X) = X \cdot \frac{\text{th} \left[\sqrt{\left(F + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho}{s} \right) \cdot L \cdot X} \right]}{\sqrt{\left(F + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho}{s} \right) \cdot L \cdot X}} \quad (2)$$

On notera que la grandeur complexe X et l'expression $U(X)$ ont la dimension de l'inverse d'une réponse complexe ponctuelle.

Procédé de détermination de R_{strate}

On veut déterminer la réponse complexe R_{strate} d'une
 5 strate à partir des deux réponses complexes ponctuelles déterminées dans le fond du puits respectivement aux profondeurs z_b et z_h par la relation :

$$R(z) = \frac{P(z)}{Q(z)} = \frac{\Delta P(z)}{\Delta Q(z)} \cdot e^{-i(\psi(z) - \phi(z))} \quad (\text{Pa.s.m}^{-3}).$$

Pour cela, on commence par déterminer un profil de
 10 production sur toute la hauteur du gisement en utilisant la sonde 24 selon un protocole bien connu dans le métier puis, en interprétant ces mesures grâce à l'un des progiciels bien connus dans le métier, on détermine les profils respectifs du débit de fond stabilisé $q(z)$, de la pression de fond stabilisée $p(z)$, de
 15 la masse volumique de l'effluent $\rho(z)$, de la compressibilité de l'effluent $c(z)$, de la masse volumique virtuelle correspondant au gradient de pertes de charge $\rho_{PDC}(z)$; à partir de ces profils primaires, on peut déterminer le profil du gradient de pression tangent linéarisé par la relation :

$$20 \quad F(z) = \lambda \cdot \rho_{PDC}(z) \cdot g / q(z)$$

où λ est un facteur adimensionnel compris entre 1,8 et 2 et où g figure l'accélération de la pesanteur terrestre ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$).

En pratique, $\rho(z)$, $c(z)$ et $F(z)$ varient lentement avec la profondeur, de sorte qu'on peut facilement en obtenir des
 25 valeurs moyennes représentatives pour tout un tronçon du puits de longueur modérée en effectuant de simples quadratures ; il suffit alors de reporter ces valeurs moyennes représentatives dans les relations où elles doivent être utilisées.

En résolvant les équations couplées en $P(z)$ et $Q(z)$
 30 qui régissent l'écoulement de l'effluent dans le puits entre le mur et le toit de la strate productrice quand on y impose des modulations périodiques sinusoïdales entretenues de pulsation ω , l'inventeur a démontré que R_{strate} s'exprime alors par la relation (3) :

$$\frac{1}{R_{\text{strate}}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{strate}}} \cdot (X - i \cdot \omega \cdot \Delta C). \quad (3)$$

En pratique, l'argument de la tangente hyperbolique intervenant dans la définition de l'expression $U(X)$ est suffisamment petit pour que l'on puisse approximer la tangente hyperbolique $\text{th}(x)$ par x , et remplacer $U(X)$ par X . Il devient
 5 alors possible d'expliciter la réponse complexe de la strate productrice à partir des relations (2) et (3) :

$$\frac{1}{R_{\text{strate}}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{strate}}} \cdot \left(\frac{1}{R_h} - \frac{1}{R_b} - i \cdot \omega \cdot \Delta C + \frac{F \cdot L}{R_h \cdot R_b} + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho \cdot L}{s \cdot R_h \cdot R_b} \right) \quad (4)$$

Cette expression met en évidence les trois termes
 10 correctifs induits par la présence de l'effluent dans le puits:

- Compressibilité : c'est le terme $i \omega \rho \Delta C / \rho_{\text{strate}}$ qui ne dépend que de la pulsation du test et du facteur d'emmagasinement de la partie du puits comprise entre les deux points de mesure.
- Viscosité : la viscosité de l'effluent induit des pertes de
 15 charge le long du puits qui se traduisent par des gradients tangents non nuls ; les réponses complexes mesurées respectivement en haut et en bas de la strate figurent explicitement dans l'expression du terme correctif $\rho FL / (\rho_{\text{strate}} R_h R_b)$, mais la pulsation ω n'intervient que par son
 20 effet sur les réponses complexes.
- Inertie : la modulation périodique du débit provoque des à-coups au sein de l'effluent doué de masse, qui à leur tour génèrent des ondes de pression perturbatrices dont on tient compte par la présence du terme $(\rho / \rho_{\text{strate}}) i \omega \rho L / (s R_h R_b)$ qui
 25 s'annulerait si la masse volumique était nulle et qui dépend de la pulsation, à la fois directement et par la présence des réponses complexes.

On notera que parmi les trois termes correctifs ci-dessus, le terme de compressibilité peut être important (de 5 à
 30 10%) si la compressibilité c , et partant le coefficient d'emmagasinement du fond du puits ΔC , est élevée, ce qui est par exemple le cas pour un gaz ; le terme de viscosité peut être important (de 5 à 10%) si le coefficient de perte de charge

tangent linéarisé F est élevé, ce qui est le cas pour certaines huiles lourdes ; et le terme d'inertie qui est toujours nettement inférieur aux deux termes correctifs précédents n'est toutefois plus négligeable pour les modulations rapides, disons
 5 lorsque la période passe sous la barre des 30 secondes.

Souvent la strate productrice débouche dans le puits par une zone "centrale" dorénavant indicée par "c" située entre deux zones dites "stables" où aucun effluent ne pénètre ni ne s'évacue, que l'on indicera encore par "b" pour la zone
 10 inférieure et par "h" pour la zone supérieure. Si les points de mesure du PLT ont été placés dans les zones stables, respectivement à une distance L_b en dessous du mur de la strate et à une distance L_h au-dessus du toit de la strate, la réponse complexe de la strate productrice s'obtient par les relations
 15 suivantes :

$$\frac{1}{R_{strate}} = \frac{\rho_c}{\rho_{strate}} \cdot \left[\frac{1}{R_h} - \frac{1}{R_b} - i\omega \cdot (\Delta C_b + \Delta C_c + \Delta C_h) + T_b + T_c + T_h \right] \quad (5)$$

avec :

$$J_{b,c,h} = \left(F_{b,c,h} + i \frac{\omega}{s} \cdot \rho_{b,c,h} \right) \cdot L_{b,c,h} \quad (5-1)$$

$$T_b = \frac{J_b \cdot (1 + i\omega \cdot \Delta C_b \cdot R_b)}{R_b \cdot (R_b + J_b)} \quad (5-2)$$

$$T_c = \frac{J_c \cdot (1 + i\omega \cdot \Delta C_b \cdot R_b) \cdot (1 - i\omega \cdot \Delta C_h \cdot R_h)}{(R_b + J_b) \cdot (R_h - J_h)} \quad (5-3)$$

$$T_h = \frac{J_h \cdot (1 - i\omega \cdot \Delta C_h \cdot R_h)}{R_h \cdot (R_h - J_h)} \quad (5-4)$$

25

Des modes de réalisation particuliers de la présente invention ont été décrits. Diverses variantes et modifications apparaîtront à l'homme de l'art. En particulier, divers types de vannes réglables de sortie actionnables en modulation pourront
 30 être utilisés. De plus, bien qu'un mode de détermination précis

de paramètres d'un puits ait été décrit en relation avec une modulation de débit et de pression provoquée par la modulation d'une vanne réglable de sortie de production, ce mode de détermination de paramètres pourra également être utilisé si d'autres
5 moyens de modulation de débit et de pression sont mis en œuvre.

 Selon un aspect de la présente invention on cherche à améliorer la précision de la mesure $q(z)$ de débit ponctuel en régime stabilisé mesuré dans le puits à la profondeur z . En effet, les débitmètres couramment utilisés dans une sonde PLT
10 sont généralement des dispositifs donnant une mesure proportionnelle plutôt qu'une mesure absolue. De plus, la mesure fournie dépend du centrage du débitmètre par rapport à l'axe du puits. On propose donc ici le mode d'étalonnage suivant :

- placer le débitmètre de la sonde à une position correspondant
15 à la limite supérieure du gisement,
- mesurer le débit à la sortie du puits par l'un des moyens classiques couramment utilisés pour mesurer ce débit, et
- fixer que la valeur fournie par le débitmètre de la sonde est la valeur mesurée en sortie.

20 Par ailleurs, dans la description qui précède, on a supposé que le forage dans le gisement s'étendait verticalement, il sera clair que ce forage pourra avoir toute autre inclinaison.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de détermination de la réponse complexe d'une strate perméable au fond d'un puits en exploitation, le puits comprenant une tête de puits équipée d'une vanne de sortie et le fond du puits comprenant une sonde (24) de mesure de
5 pression et de débit réglable en hauteur, comprenant les étapes suivantes :

moduler de façon périodique le degré d'ouverture de la vanne de sortie et, tandis que la modulation est en cours :

- mesurer la pression et le débit dans le puits en
10 haut/bas de la strate pendant un certain nombre de périodes de modulation, après un certain retard ; et

- mesurer la pression et le débit dans le puits en bas/haut de la strate pendant un certain nombre de périodes de modulation, immédiatement après mise en place de la sonde.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les étapes de mesures sont répétées pour d'autres strates immédiatement après mise en place de la sonde en haut/bas de ces autres strates.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, dans lequel
20 la modulation modifie le débit de sortie de 5 à 15%.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la modulation comporte une superposition de plusieurs périodes de modulation.

5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel la
25 superposition de périodes comporte des périodes présentant entre elles des rapports égaux à des puissances entières de 2.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel on détermine la réponse complexe R_{strate} de la strate :

- en mesurant et/ou en calculant au préalable les
30 valeurs de :

la pression ponctuelle $p(z)$ en régime stabilisé mesurée dans le puits à la profondeur z dirigée vers le fond du puits, l'origine étant prise au niveau du toit de la strate,

- la pulsation ω de la modulation,
la longueur L du puits entre le toit et le mur de la strate,
la compressibilité c de l'effluent dans le tubage,
la masse volumique moyenne ρ de l'effluent circulant dans le
5 puits entre le mur et le toit de la strate,
la masse volumique ρ_{strate} de l'effluent produit par la strate,
le coefficient de pertes de charge tangent linéarisé dans le
tubage $F = \delta^2 p / \delta q \cdot \delta z$,
l'aire s de la section droite du puits,
10 le débit ponctuel en régime stabilisé $q(z)$ mesuré dans le puits
à la profondeur z ,
la pression complexe ponctuelle $P(z) = \Delta P(z) \cdot e^{i(\omega \cdot t + \phi(z))}$ de la
modulation mesurée dans le puits à la profondeur z ,
le débit complexe ponctuel $Q(z) = \Delta Q(z) \cdot e^{i(\omega \cdot t + \psi(z))}$ de la modulation,
15 le facteur d'emmagasinement $\Delta C = c \cdot s \cdot L$ d'un tronçon de puits de
longueur L , et

- en appliquant la relation suivante :

$$\frac{1}{R_{strate}} = \frac{\rho}{\rho_{strate}} \cdot (X - i \cdot \omega \cdot \Delta C). \quad (1)$$

- où X est une grandeur complexe solution de l'équation implicite
20 suivante :

$$X = \frac{\left(F + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho}{s} \right) \cdot L \cdot U(X)}{R_h \cdot R_b \cdot U(X) - (R_b - R_h)}. \quad (2)$$

dans laquelle, pour commodité d'écriture, l'expression $U(X)$
figure le groupe de termes complexes suivant :

$$U(X) = X \cdot \frac{\operatorname{th} \left[\sqrt{\left(F + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho}{s} \right) \cdot L \cdot X} \right]}{\sqrt{\left(F + i \cdot \frac{\omega \cdot \rho}{s} \right) \cdot L \cdot X}} \quad (3)$$

- 25 7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel on
applique la relation simplifiée suivante :

$$\frac{1}{R_{strate}} = \frac{\rho_c}{\rho_{strate}} \cdot \left[\frac{1}{R_h} - \frac{1}{R_b} - i \cdot \omega \cdot (\Delta C_b + \Delta C_c + \Delta C_h) + T_b + T_c + T_h \right] \quad (5)$$

avec :

$$J_{b,c,h} = \left(F_{b,c,h} + i \frac{\omega}{s} \cdot \rho_{b,c,h} \right) \cdot L_{b,c,h} \quad (5-1)$$

$$T_b = \frac{J_b \cdot (1 + i \cdot \omega \cdot \Delta C_b \cdot R_b)}{R_b \cdot (R_b + J_b)} \quad (5-2)$$

$$T_c = \frac{J_c \cdot (1 + i \cdot \omega \cdot \Delta C_b \cdot R_b) \cdot (1 - i \cdot \omega \cdot \Delta C_h \cdot R_h)}{(R_b + J_b) \cdot (R_h - J_h)} \quad (5-3)$$

$$T_h = \frac{J_h \cdot (1 - i \cdot \omega \cdot \Delta C_h \cdot R_h)}{R_h \cdot (R_h - J_h)} \quad (5-4)$$

10 où l'indice c désigne une zone centrale d'une strate productrice
l'indice b la zone inférieure et l'indice h la zone supérieure.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1
à 7, dans lequel le débitmètre de la sonde est étalonné en
appliquant les étapes suivantes :

- 15 - placer la sonde à une position correspondant à la limite
supérieure du gisement,
- mesurer le débit à la sortie du puits, et
- fixer que la valeur fournie par le débitmètre de la sonde est
la valeur mesurée en sortie.

