



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
13.11.2002 Bulletin 2002/46

(51) Int Cl.7: **E21B 49/00**

(21) Numéro de dépôt: **02290995.6**

(22) Date de dépôt: **19.04.2002**

(84) Etats contractants désignés:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE TR
 Etats d'extension désignés:
AL LT LV MK RO SI

(30) Priorité: **09.05.2001 FR 0106216**
12.06.2001 FR 0107764

(71) Demandeur: **INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE**
92852 Rueil-Malmaison Cedex (FR)

(72) Inventeurs:
 • **Ding, Yu Didier**
78400 Chatou (FR)
 • **Longeron, Daniel**
78500 Sartrouville (FR)
 • **Renard, Gérard**
92500 Rueil-Malmaison (FR)
 • **Audibert-Hayet, Annie**
78290 Croissy sur Seine (FR)

(54) **Méthode pour déterminer par simulation numérique les conditions de restauration par les fluides d'un gisement, d'un puits complexe endommagé par les opérations de forage**

(57) -Méthode pour déterminer par simulation numérique les conditions optimales à imposer dans un puits horizontal (ou complexe) foré au travers d'un gisement souterrain pour éliminer progressivement (restaurer) par les fluides issus du gisement, des dépôts ou cakes qui se sont formés dans au moins une zone à la périphérie du puits, suite aux opérations de forage et de complétion.

- La méthode comporte essentiellement l'acquisition de données initiales obtenues par des mesures en laboratoire des valeurs, selon la perméabilité initiale (k_i) des formations entourant le puits, de l'épaisseur des cakes ainsi que des valeurs de perméabilité endommagée (k_d) et de perméabilité restaurée (k_f) de cette zone, en fonction de la distance (r) à la paroi du puits, la discrétisation de la zone endom-

magée par un maillage cylindrique en 3D formant des blocs d'épaisseurs radiales petites relativement au diamètre du puits, et la résolution dans ce maillage de l'équation de diffusivité modélisant les écoulements des fluides au travers des cakes en tenant compte des données initiales mesurées et en modélisant l'évolution de la perméabilité en fonction des débits (Q) de fluides s'écoulant au travers des cakes, pour en déduire les conditions optimales à appliquer pour la mise en production du puits.

- Applications à la mise en production de gisements d'hydrocarbures par exemple en offshore profond dans des formations peu consolidées (Golfe du Mexique, Angola, etc.).

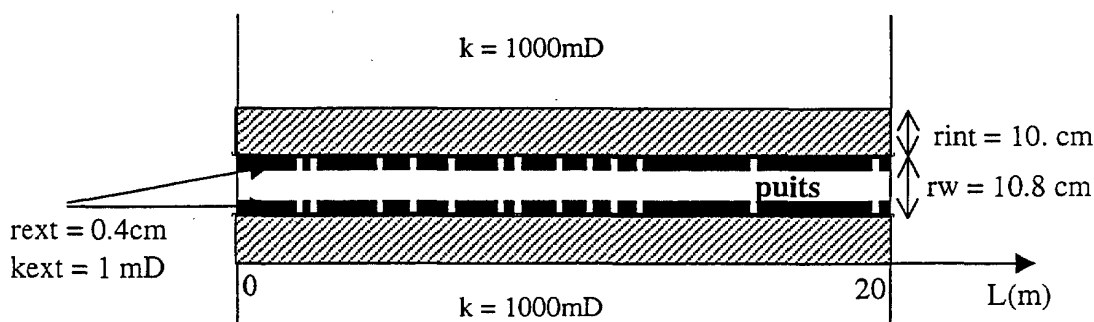


Fig. 13

Description**DESIGNATION DU DOMAINE TECHNIQUE**

[0001] La présente invention concerne une méthode pour déterminer par simulation numérique les conditions optimales à imposer dans un puits horizontal (ou complexe) foré au travers d'un gisement souterrain, pour éliminer progressivement (restaurer) par balayage naturel au moyen des fluides de production issus du gisement, des dépôts ou cakes qui se sont formés dans au moins une zone à la périphérie du puits, suite aux opérations de forage et de complétion.

[0002] Les gens de l'art savent que l'on distingue les cakes dits internes formés par envahissement des pores de la roche par la boue et les cakes dits externes constitués d'un revêtement de boue sur la paroi externe du puits.

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0003] Les dommages causés aux formations environnant les puits horizontaux (ou complexes), souvent des trous ouverts équipés pour la production, constitue un point critique pour les champs pétroliers en offshore profond où, pour obtenir des coûts de développement acceptables, on ne met en production qu'un nombre limité de puits très productifs.

[0004] Les essais que l'on peut faire pour caractériser l'endommagement des formations au voisinage d'un puits sont d'une importance primordiale. Ils permettent de choisir le fluide de forage le mieux approprié pour minimiser ou réduire la détérioration de la perméabilité au voisinage des puits et aussi d'optimiser les techniques de nettoyage des puits.

[0005] Au cours des cinq dernières années, le demandeur a mis au point un équipement spécifique d'essai en laboratoire et des procédures destinées à caractériser l'endommagement des formations dû au forage au cours d'opérations en surpression et à quantifier les performances de différentes techniques de nettoyage mises en oeuvre dans l'industrie comme en témoignent les publications suivantes

- Alfenore, J. et al, « What Really Matters in our Quest of Minimizing Formation Damage in Open Hole Horizontal Wells », 1999, SPE 54731 ;
- Longeron, D. et al, « Experimental Approach to Characterize Drilling Mud Invasion, Formation Damage and Cleanup Efficiency in Horizontal Wells with Openhole Completions » 2000, SPE 58737 ; ou
- Longeron, D. et al, « an Integrated Experimental Approach for Evaluating Formation Damages due to Drilling and Completion Fluids », 1995, SPE 30089.

[0006] Cependant les études menées en laboratoire s'avèrent souvent insuffisantes à elles seules, pour modéliser de façon réaliste, les conditions de production à appliquer dans les puits pour restaurer au mieux la perméabilité des formations environnantes, sans pour autant provoquer des venues de sable. La modélisation des processus de restauration des formations environnant un puits présentent un grand intérêt économique pour la mise en exploitation des champs.

LA METHODE SELON L'INVENTION

[0007] La méthode selon l'invention permet de simuler au mieux les conditions optimales à imposer dans un puits foré au travers d'un gisement souterrain à une trajectoire quelconque, pour l'élimination progressive par des fluides issus du gisement, des dépôts ou cakes qui se sont formés dans au moins une zone à la périphérie du puits, suite aux opérations de forage.

[0008] Elle comporte l'acquisition de données initiales obtenues par des mesures en laboratoire des valeurs de perméabilité initiale (k_i) des formations entourant le puits, de l'épaisseur des cakes ainsi que des valeurs de perméabilité endommagée (k_d) et de perméabilité restaurée (k_f) de la zone, en fonction de la distance (r) à la paroi du puits, la discrétisation de la zone endommagée par un maillage cylindrique en 3D formant des blocs d'épaisseur radiale faible relativement au diamètre du puits et la résolution dans ce maillage, d'équations de diffusivité modélisant les écoulements des fluides au travers des cakes en tenant compte des données initiales mesurées et en modélisant l'évolution de la perméabilité en fonction des débits (Q) de fluides s'écoulant au travers des cakes, et on en déduit les conditions optimales à appliquer pour la mise en production du puits.

[0009] On modélise la restauration de la perméabilité en tout point à distance (r) de la paroi en considérant par exemple que la perméabilité varie proportionnellement à l'écart entre la perméabilité endommagée (k_d) et la perméabilité restaurée (k_f), le coefficient de proportionnalité dépendant d'une loi empirique de variation de la perméabilité en

fonction de la quantité de fluides au travers des cakes.

[0010] La simulation opérée suivant la méthode permet aux ingénieurs de réservoir de mieux prévoir le meilleur schéma d'exploitation du gisement en évitant les inconvénients tels que les venues de sable. Elle permet aussi aux foreurs, compte tenu de données de perméabilité connues ou estimées, de choisir des fluides convenant plus particulièrement pour le forage des puits et la mise en place des équipements.

PRESENTATION SOMMAIRE DES FIGURES

[0011] D'autres caractéristiques et avantages de la méthode et du dispositif selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'un exemple non limitatif de réalisation, en se référant aux dessins annexés où :

- la Fig.1 montre les courbes de variation en fonction de la distance r à la paroi du puits endommagé, d'un premier coefficient multiplicateur $c_1(r)$ de la perméabilité d'endommagement et d'un deuxième coefficient multiplicateur $c_2(r)$ de la perméabilité restaurée ;
- la Fig.2 montre une loi empirique de variation d'un coefficient de variation de la perméabilité à la distance r de la paroi du puits endommagé, en fonction du débit de fluides Q_s au travers des cakes ;
- la Fig.3 montre un exemple de maillage radial pour la résolution des équations de diffusivité ;
- la Fig.4 illustre le calcul du flux F avec un maillage radial ;
- les Fig.5a et 5b illustrent le calcul de l'IP numérique respectivement sans cake externe et avec cake externe C_{ext} , au travers d'une maille W_{cell} ;
- la Fig.6 montre schématiquement une portion de puits de longueur L et de rayon r_w comportant 4 zones de profondeur r centrées autour du puits, avec des perméabilités k différentes 100mD ou 1000mD et un cake interne d'épaisseur r_{int} ;
- les Fig.7, 8 montrent les variations en fonction de la distance d au puits, des coefficients multiplicateurs respectivement de perméabilité endommagée $C_1(r)$ et de perméabilité restaurée ou de retour $c_2(r)$, qui ont été mesurées au laboratoire dans différentes zones et utilisées dans les exemples ;
- la Fig.9 montre la courbe de variation de la perméabilité $c(r)$ dans le cake interne en fonction du volume cumulé q de fluide par unité de surface offerte à l'écoulement, mesuré au laboratoire et utilisée dans les exemples ;
- les Fig. 10a à 10c montrent respectivement les variations en fonction du temps $t(d)$ exprimé en jours, des débits d'huile FR (en m3/j) dans différentes zones perforées le long du puits, correspondant à 3 simulations différentes SM1 à SM3, dans l'exemple 1 (cas a) ;
- les Fig. 11a et 11b montrent les variations en fonction du temps $t(d)$ exprimé en jours, du coefficient de perméabilité $c(r)$ du cake interne dans deux zones différentes le long du puits (exemple 1) ;
- la Fig. 12 montre la variation en fonction du temps du débit total FR(m3/d) dans le cas c de l'exemple 1, pour trois simulations différentes SM1 à SM3 ;
- la Fig. 13 montre la distribution du cake externe le long de la portion de puits, dans l'exemple 2 ;
- les Fig. 14a à 14c montrent respectivement, dans l'exemple 2, la distribution sur la longueur $L(m)$ du puits, du cake externe (Fig.14a) et du débit FR le long du puits au temps $t=0.5$ j (Fig.14b) et au temps $t=5$ j (Fig.14c) ;
- les Fig.15a à 15f montrent respectivement, dans l'exemple 2, la distribution sur la longueur $L(m)$ du puits, du cake externe (Fig.15a) et du débit FR le long du puits, respectivement au temps $t = 0.1$ j (Fig.15b), $t = 0.3$ j (Fig.15c), $t = 0.5$ j (Fig.15d), $t = 1$ j (Fig.15e), et $t = 5$ j (Fig.15f) ;
- la Fig. 16 montre le débit total du puits FR en fonction du temps exprimé en jours, dans l'exemple 2, pour les deux cas c_1 et c_2 ;

- la Fig.17 est un tableau montrant un exemple de maillage avec NX mailles réparties le long du puits, progressivement plus épaisses en s'éloignant radialement de la paroi du puits (direction $r(m)$) ; et
- la Fig.18 est un tableau montrant la durée d'application $t(d)$ exprimée en jours, d'une pression de fond de puits P (bar) imposée.

DESCRIPTION DETAILLEE DE LA METHODE

1) Acquisition de données de laboratoire

[0012] Les essais d'endommagement des formations sont d'une importance primordiale pour minimiser ou pour réduire la détérioration de la perméabilité au voisinage des puits en choisissant le fluide de forage le mieux approprié et en optimisant les techniques de nettoyage des puits. Au cours des cinq dernières années, le demandeur a mis au point un équipement spécifique d'essai en laboratoire et des procédures destinées à caractériser l'endommagement des formations dû au forage au cours d'opérations en surpression et à quantifier les performances de différentes techniques de nettoyage mises en oeuvre dans l'industrie comme le témoignent les publications suivantes :

- Alfenore, J. et al, « What Really Matters in our Quest of Minimizing Formation Damage in Open Hole Horizontal Wells », 1999, SPE 54731 ;
- Longeron, D. et al, « Experimental Approach to Characterize Drilling Mud Invasion, Formation Damage and Cleanup Efficiency in Horizontal Wells with Openhole Completions » 2000, SPE 58737 ; ou
- Longeron, D. et al, « an Integrated Experimental Approach for Evaluating Formation Damages due to Drilling and Completion Fluids », 1995, SPE 30089.

[0013] Les essais de pression de fuite sont effectués avec une cellule de filtration dynamique qui peut recevoir des carottes d'un diamètre de 5 cm et d'une longueur pouvant atteindre 40 cm. La cellule est équipée par exemple de cinq prises de pression situées à 5, 10, 15, 20 et 25 cm de la face d'entrée de la carotte. Les prises de pression permettent de surveiller les chutes de pression à travers six sections de la carotte pendant que l'on fait circuler la boue et circuler en retour l'huile afin de simuler la production du puits. En vue de reproduire le processus dynamique d'invasion de la boue et du filtrat de la boue, les essais de laboratoire sont réalisés dans des conditions de puits représentatives (température, surpression et taux de cisaillement appliqué à la boue, carottes saturées en huile et en eau connée, etc.). De l'huile est ensuite injectée en sens inverse (courant de retour) à débit constant afin de simuler la production du puits. L'évolution des perméabilités de retour est calculée, pour chaque section, en fonction du volume cumulé d'huile injectée. La valeur finale stabilisée de la perméabilité de retour est ensuite comparée à la perméabilité initiale non détériorée afin d'évaluer la détérioration résiduelle en fonction de la distance par rapport à la face d'entrée de la carotte. D'une manière générale, on a observé qu'une quantité totale de 10 à 20 PV (maximum une centaine de PV) d'huile injectée était suffisante pour obtenir une valeur stabilisée de la perméabilité de retour après endommagement avec une boue à base d'huile.

II - Modèle numérique simplifié pour supprimer les dommages au voisinage du puits

[0014] Considérant un puits foré dans la zone pétrolière avec une boue à base d'huile, on admet que les propriétés de l'huile dans le réservoir sont identiques à celles observées dans le filtrat. L'équation de l'écoulement au voisinage du puits est ainsi régie par une équation monophasique qui s'écrit comme suit :

$$- \operatorname{div} \left(\frac{k}{\mu} \nabla p \right) = c \phi \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

où p représente la pression, k, la perméabilité absolue, μ , la viscosité, c, la compressibilité et ϕ , la porosité. La viscosité μ et la compressibilité c dans le filtrat sont considérées comme identiques à celles observées dans l'huile qui sature le réservoir. On considère que la pression initiale dans le réservoir est hydrostatique au début de la production.

II. 1 Modélisation du cake de filtration interne

[0015] Le cake de filtration interne réduit la perméabilité du réservoir au voisinage du puits. Comme nous l'avons indiqué plus haut, les réductions de la perméabilité à l'issue de la période de forage et à la fin d'un nettoyage complet peuvent être obtenues à partir de mesures effectuées en laboratoire. Pour la modélisation, nous utilisons le facteur de réduction de la perméabilité sous forme adimensionnelle pour représenter la variation de la perméabilité. L'utilisation de la forme adimensionnelle présente l'avantage de permettre de regrouper les données par zones géologiques.

[0016] Soient k_i la perméabilité initiale, k_d la perméabilité après endommagement et k_f la perméabilité finale de retour ; la perméabilité après endommagement et la perméabilité finale de retour sont généralement fonction de r la distance au puits. $c_1(r) = \frac{K_d(r)}{K_i}$ et $c_2(r) = \frac{K_f(r)}{K_i}$ étant les courbes du facteur de réduction de la perméabilité en fonction de r avant le nettoyage et après le retour de fluide respectivement (Figure 1), la variation de la perméabilité au voisinage du puits est généralement limitée par ces deux courbes au cours de la période de retour de fluide. $c_1(r)$ correspond à la courbe de perméabilité après endommagement et $c_2(r)$ correspond à la courbe de perméabilité de retour stabilisée.

[0017] Comme nous l'avons indiqué plus haut, la variation de la perméabilité dans la zone occupée par le cake de filtration interne au cours de la période de retour de fluide dépend de la quantité d'huile produite qui s'écoule vers le puits. Nous utilisons la forme adimensionnelle suivante pour décrire cette variation (Figure 2) :

$$c_0(Q) = \frac{K(Q) - K_d}{K_f - K_d} \quad (2)$$

où Q est le débit d'écoulement total à travers le milieu poreux dans le sens de l'écoulement divisé par la surface poreuse (surface des pores offerte à l'écoulement). Cette courbe représente la variation de la perméabilité par rapport à l'écoulement à travers une unité de surface poreuse. Elle correspond généralement à un sens d'écoulement donné. En pratique, le sens de l'écoulement est la direction radiale vers le puits. Lorsque $Q = 0$, il n'y a aucun écoulement permettant de nettoyer le cake de filtration, la perméabilité correspond à la perméabilité après endommagement avec $k(0) = k_d$. Nous avons donc $c_0(0) = 0$. Lorsque Q est très grand, le cake de filtration est entièrement nettoyé, la perméabilité correspond à la perméabilité de retour finale avec $k(+\infty) = k_f$. Dans ce cas, nous avons $c_0(+\infty) = 1$.

[0018] La courbe de variation de la perméabilité peut être mesurée à partir de données de laboratoire et elle peut être considérée comme indépendante de l'emplacement dans une carotte. Ainsi, une courbe est utilisée pour chaque zone géologique. Cette courbe est monotone. Son maximum est généralement atteint pour plusieurs m^3 (ou plusieurs dizaines de m^3) de fluide traversé par unité de surface poreuse.

[0019] La perméabilité k à la distance r du puits au cours de la période de retour de fluide peut s'écrire sous la forme triviale suivante :

$$k(r, Q) = (k_f(r) - k_d(r)) \frac{K_r(r, Q) - K_d(r)}{K_f(r) - K_d(r)} + k_d(r) \quad (3)$$

[0020] En utilisant les courbes adimensionnelles définies ci-dessus et en prenant en compte l'équation (2), le facteur de réduction de la perméabilité $c(r, Q)$ est exprimé par :

$$c(r, Q) = (c_2(r) - c_1(r)) c_0(Q) + c_1(r) \quad (4)$$

[0021] Initialement, $Q = 0$, la réduction de la perméabilité correspond à celle obtenue après invasion du filtrat (perméabilité après endommagement) :

$$c(r, 0) = c_1(r) \quad (5)$$

[0022] A la fin du retour de fluide, lorsque la quantité de fluide en écoulement Q est très importante avec $c_0(Q) \approx 1$, la réduction de la perméabilité correspond à l'état restauré avec la perméabilité de retour stabilisée :

$$c(r, Q) = c_2(r) \quad (6)$$

[0023] La variation de la perméabilité dans la zone occupée par le cake de filtration interne est modélisée avec l'équation (3). Contrairement au cake de filtration interne, l'impact du cake de filtration externe décrit ci-après est modélisé sous la forme d'un coefficient de paroi dans le modèle numérique discrétisé.

II.2 Maillage et schémas numériques

[0024] Un maillage cylindrique $r\theta x$ est utilisé pour la modélisation de l'écoulement du fluide au voisinage d'un puits horizontal (Figure 3) : r est la direction radiale, perpendiculaire à l'axe du puits, θ est la direction angulaire et x est la direction le long du puits. Avec ce maillage, les limites du puits sont discrétisées et des mailles de très petite taille peuvent être utilisées pour discrétiser la zone occupée par le cake de filtration interne. En général, le rayon du puits est de l'ordre de quelques centimètres, et l'épaisseur du cake de filtration interne varie entre quelques centimètres et quelques décimètres. En vue d'obtenir une bonne description du phénomène d'élimination du cake de filtration, les mailles utilisées au voisinage du puits varient entre quelques millimètres et quelques centimètres.

[0025] Pour des mailles cylindriques, un schéma standard numérique pour l'approximation du flux entre deux points peut être utilisé pour modéliser

$$F_{i+1/2} = T_{i+1/2}(p_{i+1} - p_i) \quad (7)$$

l'écoulement. Par exemple, le flux entre deux mailles voisines i et $i+1$ dans la direction radiale est calculé par (Figure 4) :

$$\text{avec : } T_{i+1/2} = \frac{1}{\frac{1}{K_{r,i}} \ln \frac{r_{i+1/2}}{r_i} + \frac{1}{K_{r,i+1}} \ln \frac{r_{i+1}}{r_{i+1/2}}} \Delta\theta_j \Delta x_k \quad (8)$$

où j et k sont les indices des mailles considérées dans les directions θ et x , r_i représente la distance de la maille i au puits, $r_{i+1/2}$ est la distance de l'interface des mailles considérées au puits, $K_{r,i}$ est la perméabilité de la maille i dans la direction radiale, $\Delta\theta$ et Δx sont les longueurs des mailles dans les directions θ et x et T_i la transmissivité entre mailles.

[0026] Le terme « mailles de puits » désignant les mailles qui discrétisent les limites du puits, les conditions aux limites du puits sont traitées dans les mailles de puits. La pression interne du puits p_w et le débit du puits q_i sur une maille i considérée peuvent être reliés par la formule de discrétisation suivante (Figure 5a) :

$$q_i = IP_i(p_i - p_w) \quad (9)$$

$$\text{avec : } IP_i = \frac{1}{\frac{1}{K_{r,i}} \ln \frac{r_w}{r_i}} \Delta\theta_j \Delta x_k \quad (10)$$

où r_w est le rayon du puits. Cette discrétisation aux limites du puits est similaire à l'approximation de l'écoulement du fluide entre deux mailles. Cependant, pour la discrétisation des limites du puits, le coefficient de discrétisation est désigné par l'index de productivité numérique IP et non par la transmissivité T , et le flux F est remplacé par le débit du puits q_i . Cette notation est cohérente par rapport au modèle numérique de puits couramment utilisé, et le coefficient de paroi peut être intégré dans le terme de l'index de productivité numérique IP .

[0027] La perméabilité $K_{r,i}$ varie au cours du retour de fluide dans la zone occupée par le cake de filtration interne selon la formule présentée dans la section précédente. Ainsi, la transmissivité et l'index de productivité numérique IP varient également dans la simulation au cours de la période de retour de fluide.

II.3 Modélisation du cake de filtration externe

[0028] La présence du cake de filtration externe peut être prise en compte dans la formule de discrétisation via l'indice numérique IP . Dans le cas de la présence d'un cake de filtration externe d'épaisseur d_e et de perméabilité k_e , la pression du puits p_w correspond à la pression sur le rayon $r_w - d_e$ et non pas sur le rayon r_w . La chute de pression est élevée à travers le cake de filtration externe qui se trouve dans la zone située entre $r_w - d_e$ et r_w . En utilisant une nouvelle fois l'équation (9) pour relier la pression du puits p_w , la pression des mailles de puits p_i et le débit du puits q_i ,

le coefficient de discrétisation IP devrait intégrer l'impact du cake de filtration externe comme suit (Figure 5b) :

$$PI_i = \frac{1}{\frac{1}{K_{r,i}} \ln \frac{r_w}{r_i} + \frac{1}{K_e} \ln \frac{r_w}{r_w - d_e}} \Delta \theta_j \Delta x_k \quad (11)$$

[0029] On admet que le cake de filtration externe est éliminé si la différence de pression au travers de son épaisseur est supérieure à un seuil donné. Ainsi, au début du retour de fluide, le coefficient numérique IP est calculé en utilisant l'équation (11) qui intègre la présence du cake externe si ce dernier existe. Une fois que la différence de pression au travers du cake de filtration est supérieure au seuil donné, l'index de productivité numérique IP est calculé avec l'équation (10).

[0030] La perméabilité k_e du cake de filtration externe pourrait généralement être très inférieure à la perméabilité au sein du réservoir ou dans la zone occupée par le cake de filtration interne. Ainsi, en présence du cake de filtration externe, le coefficient numérique IP est très petit.

[0031] Pour réaliser les simulations on peut utiliser un outil de modélisation d'écoulements tel que le modèle ATHOS par exemple (ATHOS est un modèle de modélisation numérique développé par l'IFP). Le schéma de discrétisation utilisé est un schéma à 5-points classique pour modéliser l'équation de diffusivité en maillage cylindrique. Dans les mailles au voisinage immédiat du puits, un IP numérique est utilisé pour relier la pression dans ces mailles, la pression au fond du puits et le débit d'écoulement vers le puits. Comme la perméabilité au voisinage du puits change pendant la période de dégorgement, les transmissivités autour du puits et l'IP changent aussi en fonction de la variation des perméabilités.

[0032] Les courbes qui définissent les coefficients multiplicateurs de perméabilités en fonction de la distance au puits, $c_1(r)$ et $c_2(r)$, sont entrées dans le simulateur sous forme de tableaux de valeurs. Les valeurs correspondantes dans chaque maille sont calculées à partir de ces courbes en utilisant une interpolation linéaire comme expliqué précédemment. Le volume poreux cumulé de fluide traversant une interface entre deux mailles dans la direction radiale r est utilisé pour calculer le coefficient multiplicateur de transmissivité entre ces deux mailles à chaque instant considéré.

III Résultats numériques

[0033] Nous présentons deux exemples pour illustrer les capacités de la méthode qui a été développée: le premier concerne le dégorgement d'un cake interne sans cake externe et le deuxième le dégorgement en présence d'un cake interne et également d'un cake externe.

Exemple 1 : Dégorgement en présence du cake interne seul

[0034] On considère une partie d'un puits horizontal d'une longueur de 20 m, qui traverse 4 zones représentatives alternativement de deux types d'hétérogénéités différentes (Figure 6). Les perméabilités k des milieux correspondants, initialement sans aucun endommagement, sont de 1000 et 100 mD. La longueur de chaque milieu traversé est de 5 m. Les valeurs de la perméabilité dans les mailles où s'est formé le cake interne dû à l'endommagement sont entrées manuellement dans le jeu de données. Les courbes, par zones, du coefficient multiplicateur de la perméabilité endommagée en fonction de la distance à la paroi du puits $c_1(r)$ sont données dans la Figure 7. Les courbes de la perméabilité retour $c_2(r)$ sont présentées dans la Figure 8. Ces courbes sont discontinues car les données fournies par laboratoire sur seulement quelques points. Plus le nombre de points est important, et mieux la courbe de laboratoire est représentée. La variation de la perméabilité pendant le nettoyage en fonction de la quantité de fluide écoulé à l'unité de surface poreuse, $c_0(V)$, est présentée à la Figure 9. En pratique, le plateau maximum peut être atteint avec quelques mètres cubes de fluide passé par unité surface.

[0035] Comme on l'a vu, un maillage cylindrique est utilisé pour les simulations. Le réservoir est très grand dans la direction radiale avec un rayon extérieur de 1750 m où la condition limite est de flux nul. Sur les frontières aux deux extrémités du puits, la condition est aussi de flux nul. Les nombres et les tailles de mailles dans les directions r et x sont donnés dans la Fig.17 ($\theta=360^\circ$). Le puits est discrétisé en 80 mailles suivant sa longueur. Chaque zone de perméabilité constante est ainsi discrétisée en 20 mailles de 0.25 m. La pression initiale dans le réservoir à la cote du puits est sensiblement de 320 bar.

[0036] Deux simulations ont été faites avec différentes conditions imposées au puits :

- Un débit de $20\text{m}^3/\text{j}$ est imposé au puits pendant 1.5 jours. L'écoulement au voisinage du puits simulé avec la méthode présentée ci-dessus tenant compte de la variation de la perméabilité en cours du temps est notée SM1. Cette simulation est comparée à deux autres simulations en utilisant le modèle d'écoulement classique avec des

perméabilités inchangées, égales d'une part aux perméabilités après endommagement $c_1(r)$, et d'autre part aux perméabilités retour $c_2(r)$. Ces deux simulations sont notées SM2 et SM3.

Les résultats de simulations sont présentés pour les mailles des puits 31 et 40 situées au milieu et à la limite d'une des zones peu perméables, et pour les mailles 41 et 50 situées en limite et au milieu de la zone plus perméable suivante. La Figure 10 montre les débits d'huile au niveau de ces mailles pour les trois scénarios simulés : SM1, SM2 et SM3. Les simulations avec des perméabilités fixées, SM2 et SM3, donnent des débits constants par maille, ce qui est normal puisque la limite dans la direction r n'est pas atteinte pour le temps court simulé (1.5 jours). Par contre, les débits varient quand on modélise les variations de perméabilités dans le cake interne pendant la remise en production. Au temps 0, ces débits sont identiques à ceux des simulations avec les perméabilités consécutives à l'endommagement. Ensuite, ils se différencient en raison des perméabilités qui augmentent dans le cake interne suite au nettoyage par l'huile de la formation. Très rapidement, au bout d'une journée, ces débits rejoignent ceux simulés avec les perméabilités retour.

Les variations de perméabilité dans les mailles 31 et 50 sont présentées aux Fig.11a, 11b respectivement. Ces variations correspondent à celles dans les deux zones. Les perméabilités dans les états d'endommagement et de retour sont aussi représentées. La variation de perméabilité au cours du nettoyage est bornée par ces valeurs. Au bout d'un jour, la perméabilité dans la zone la plus perméable (maille 50) rejoint presque la valeur de perméabilité retour, et celle dans la zone moins perméable (maille 31) ne change pas beaucoup. Mais, comme la variation entre la perméabilité d'endommagement et celle de retour est très faible dans la zone peu perméable, les résultats de simulation dépendent principalement de la variation de perméabilité dans la zone la plus perméable. Sur les résultats présentés à la Fig.10, les débits augmentent dans les zones plus perméables et ils rejoignent très rapidement ceux de la simulation SM3. Les débits dans les zones peu perméables diminuent car les simulations sont faites avec un débit total imposé au puits.

Avec cette modélisation, nous pouvons également obtenir la variation de vitesse locale due au dégorgement du cake.

b). Une différence de pression de 1 bar est imposée pendant 1.5 jour.

La Fig.12 montre la variation en fonction du temps t exprimé en jours, des débits simulés FR (exprimés en m^3/j) correspondants au puits. Dans le cas de perméabilité inchangée (SM2 et SM3), les débits diminuent avec le temps. Par contre, la modélisation d'un dégorgement progressif donne un débit croissant jusqu'à un jour environ, avant de diminuer. L'augmentation de débit pendant la période initiale est due à l'augmentation de perméabilité dans le cake interne au cours de la remise en production.

Les résultats dans les mailles de puits 31, 40, 41 et 50 sont très similaires aux ceux du cas a. Les débits avec la modélisation du nettoyage de cake au temps $t=0$ sont égaux à ceux simulés avec les perméabilités d'endommagement, et ensuite ils varient et rejoignent les débits simulés avec les perméabilités de retour.

Dans cet exemple, nous observons que le nettoyage du puits est assez rapide quel que soit le scénario modélisé. Dans tous les cas, les résultats de simulation du dégorgement progressif SM1 sont très proches au bout d'un jour de ceux obtenus avec les perméabilités retour SM3. Il est possible de fournir les détails des résultats aux temps courts, comme par exemple les débits le long du puits, les pressions et les vitesses au voisinage du puits, pour mieux connaître ce qui se passe au cours du dégorgement. Toutefois, les performances du puits aux temps longs, après quelques jours, sont quasi identiques, quelles que soient les configurations étudiées, sachant que les aspects géomécaniques ne sont pas pris en compte. Dans cette hypothèse, il semble donc que les impacts du cake interne sur la performance du puits soient très limités en temps et qu'il suffise en général d'étudier cette performance en considérant la perméabilité restaurée, c'est-à-dire celle de la configuration notée SM3.

Exemple 2. Présence d'un cake externe non uniforme le long du drain

[0037] On considère la même géométrie de puits que dans l'exemple précédent. Dans cet exemple, le réservoir est homogène avec une perméabilité de 1000mD dans le milieu poreux. Le cake externe n'a pas une présence homogène le long du puits. Dans certains endroits, il n'y pas de cake externe, et dans les endroits où le cake externe est présent, celui-ci a une perméabilité k_{ext} de 1 mD et une épaisseur r_{ext} de 4 mm comme dans l'exemple précédent. La distribution de la présence du cake externe est donnée dans la Fig.13. La différence de pression nécessaire pour l'arrachement du cake externe est toujours fixée à 0.5 bar.

[0038] Deux types de conditions aux limites sont utilisés dans les simulations. Pour le premier cas, une pression de 318.2 bar est imposée au fond du puits, soit une différence de pression entre le réservoir et le puits de 1.8 bar. Pour le deuxième cas, nous imposons plusieurs paliers consécutifs de pression pour arriver à une chute totale de pression de 1.8 bar (Tableau 2).

[0039] Les Figures 14 et 15 présentent la distribution du cake externe et la répartition du débit le long du puits pour ces deux cas à différents temps de production. Dans le premier cas, les débits sont uniformes le long du puits, car les

cakes externes sont entièrement arrachés dès le début. Dans le deuxième cas, la répartition de débit varie en fonction du temps, car les cakes externes sont arrachés non uniformément à des temps différents. De plus, il y a toujours des cakes externes qui ne peuvent pas être arrachés au bout de 5 jours. La Fig.16 montre la production du puits pour ces deux cas. Dans le premier cas, la production du puits est plus forte, car tous les cakes externes sont arrachés dès le début. Mais, le maximum du débit local le long du puits est toujours inférieur à $3m^3/m.jour$. Dans le deuxième cas, le débit du puits est plus faible, mais le débit local peut être très fort avec un maximum de $4.5m^3/m.jour$. Les cakes ne peuvent toujours pas être arrachés à certains endroits. La performance du puits est largement réduite dans ce cas. Cet exemple montre que les procédures de dégorgement peuvent influencer la performance du puits même dans un réservoir homogène.

[0040] Bien qu'il paraisse tentant de vouloir imposer une forte différence de pression entre le puits et la formation, puisque c'est la procédure qui permet d'arracher le plus vite et le plus uniformément le cake externe qui limite le débit du puits, il peut être dangereux pour l'intégrité du puits d'agir ainsi si la formation est non consolidée et que des venues de sable risquent de se produire avec comme conséquence le bouchage du puits. C'est l'un des intérêts de la présente invention que de pouvoir définir la meilleure procédure de dégorgement du puits sans provoquer le risque évoqué dès lors que l'on connaît la vitesse du fluide à partir de laquelle le sable perd sa cohésion.

Revendications

1. Méthode pour simuler les conditions optimales à imposer dans un puits foré au travers d'un gisement souterrain à une trajectoire quelconque, pour l'élimination progressive par des fluides issus du gisement, des dépôts ou cakes qui se sont formés dans au moins une zone à la périphérie du puits, suite aux opérations de forage et de complétion, **caractérisée en ce qu'elle comporte**

- l'acquisition de données initiales obtenues par des mesures de laboratoire de l'épaisseur et des cakes ainsi que des valeurs de perméabilité endommagée (k_d) et de perméabilité restaurée (k_f) de la zone entourant le puits, en fonction de la distance (r) à la paroi du puits, suivant la valeur de la perméabilité initiale (k_i) de la formation autour du puits ;
- la discrétisation de la zone endommagée par un maillage cylindrique en 3D formant des blocs d'épaisseurs radiales petites relativement au diamètre du puits ; et
- la résolution dans ce maillage de l'équation de diffusivité modélisant les écoulements des fluides au travers des cakes en tenant compte des données initiales mesurées et en modélisant l'évolution de la perméabilité en fonction des débits (Q) de fluides s'écoulant au travers des cakes, pour en déduire les conditions optimales à appliquer pour la mise en production du puits.

2. Méthode selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** l'on modélise la restauration de la perméabilité en tout point à distance (r) de la paroi en considérant que la perméabilité varie proportionnellement à l'écart entre la perméabilité endommagée (k_d) et la perméabilité restaurée (k_f), le coefficient de proportionnalité dépendant d'une loi empirique de variation de la perméabilité en fonction de la quantité (Q) de fluides au travers des cakes.

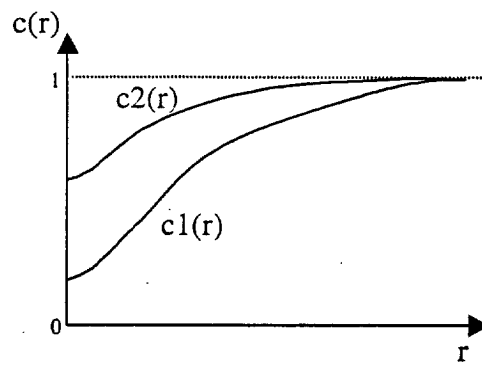


Fig. 1

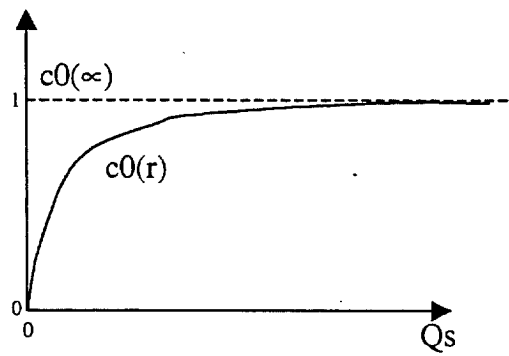


Fig. 2

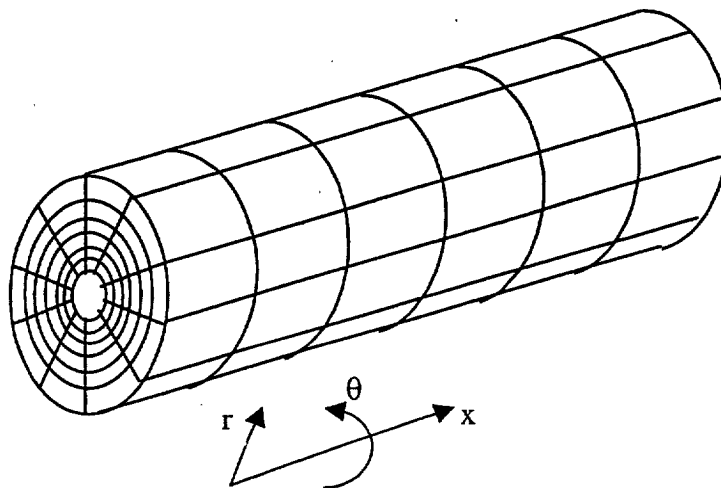


Fig. 3

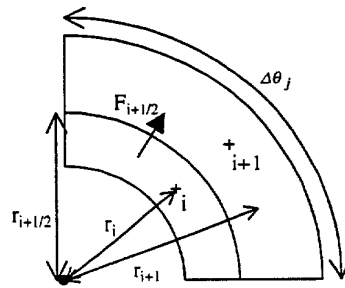


Fig. 4

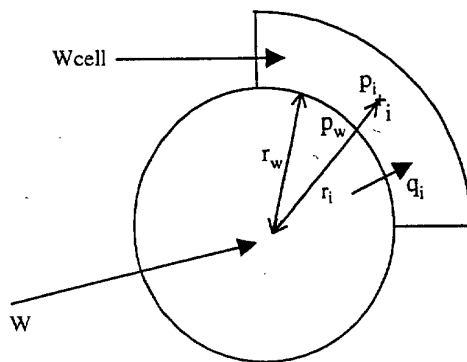


Fig. 5a

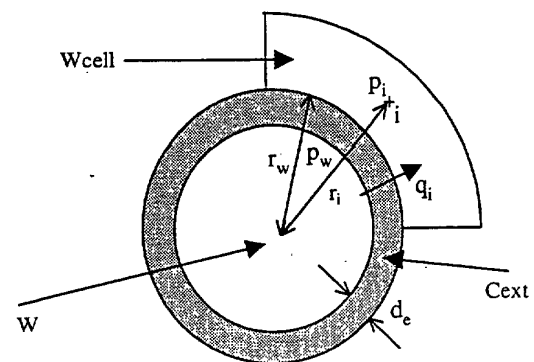


Fig. 5b

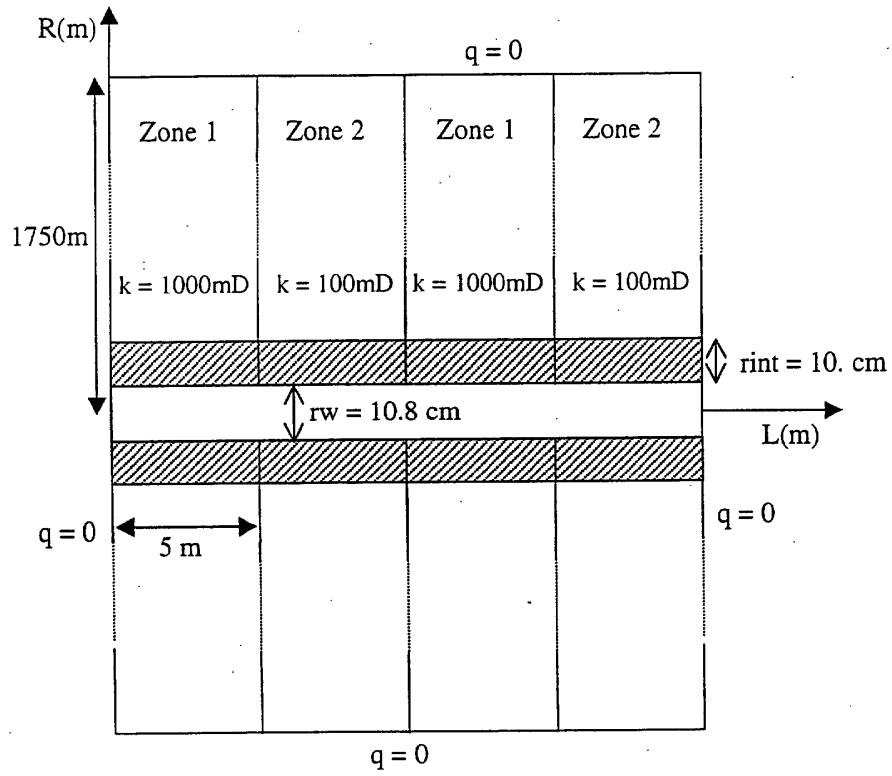


Fig. 6

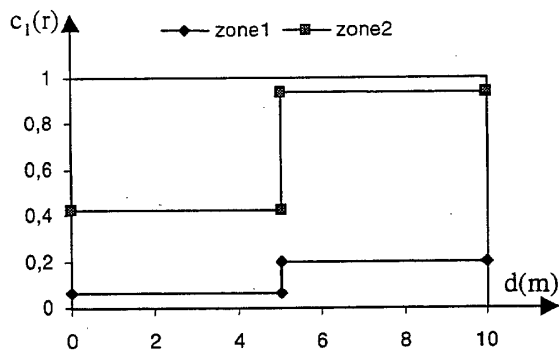


Fig. 7

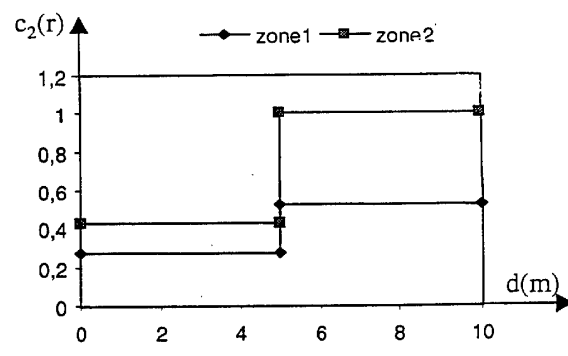


Fig. 8

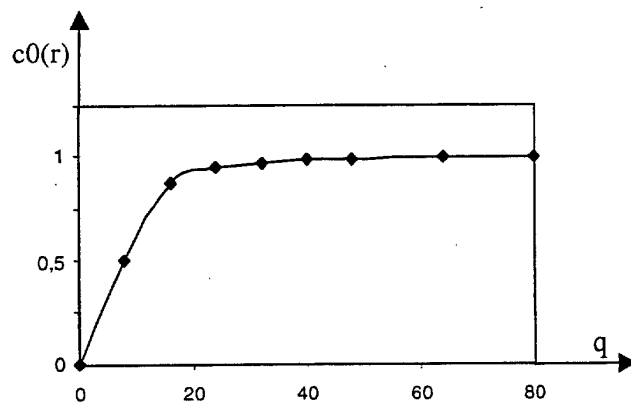


Fig. 9

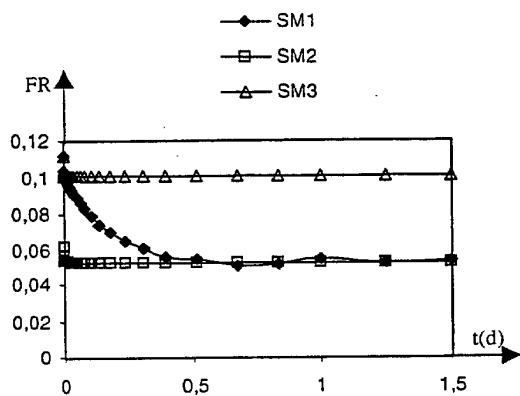


Fig. 10a

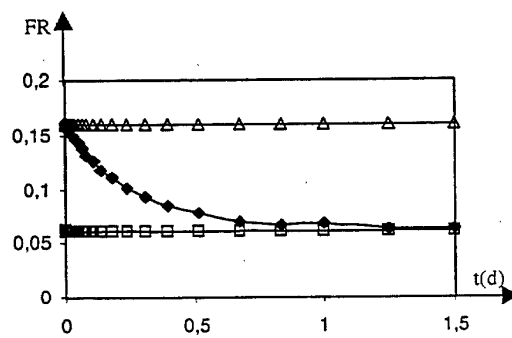


Fig. 10b

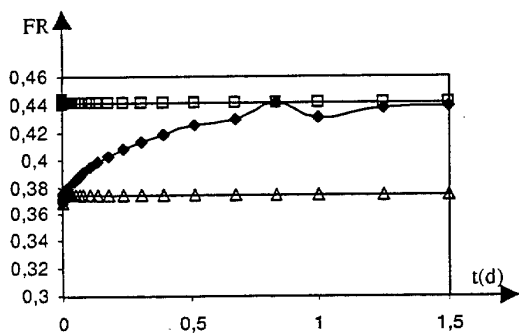


Fig. 10c

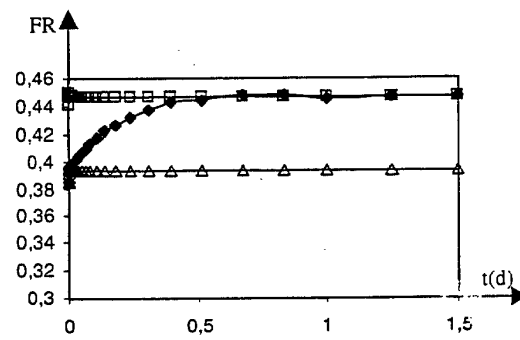


Fig. 10d

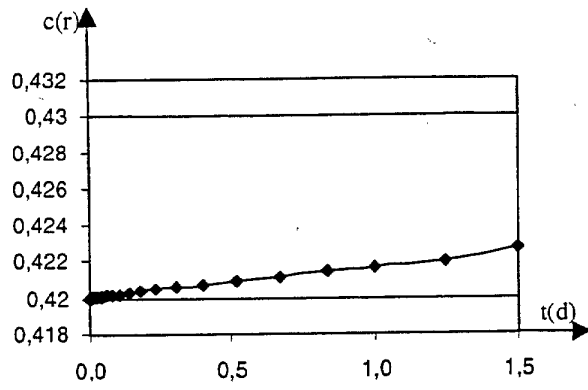


Fig. 11a

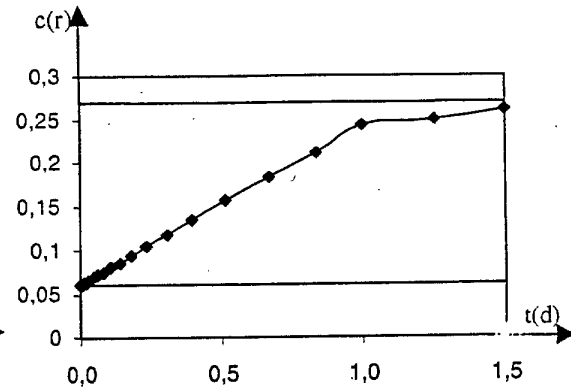


Fig. 11b

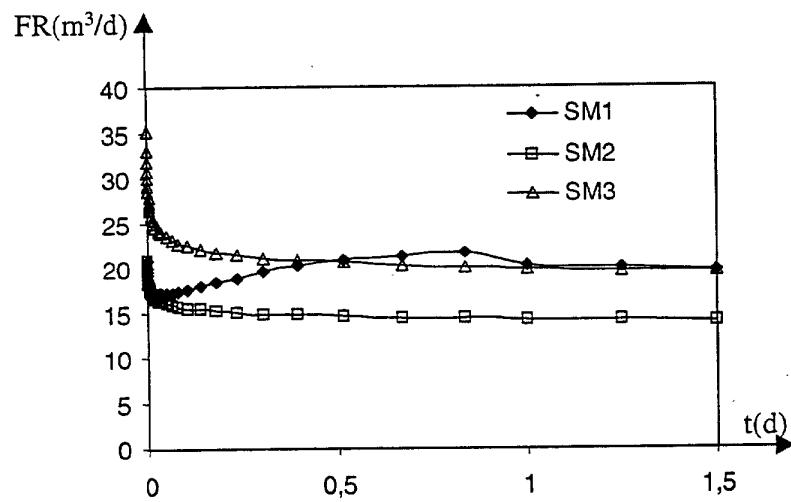


Fig. 12

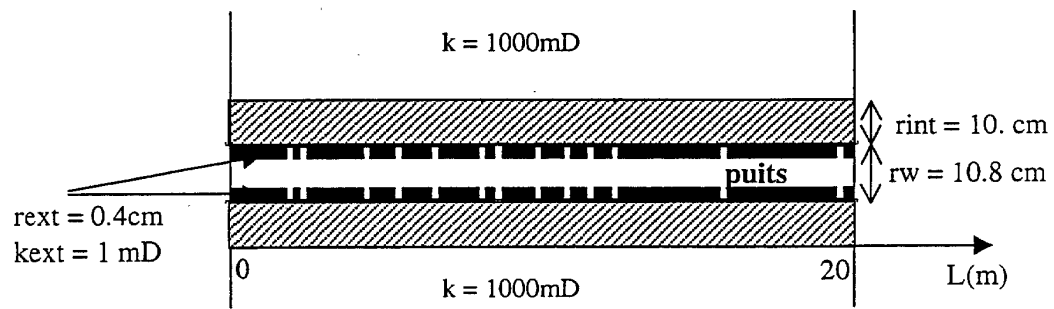


Fig. 13



Fig. 14a

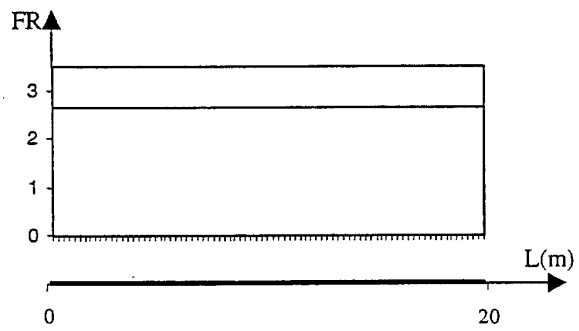


Fig. 14b

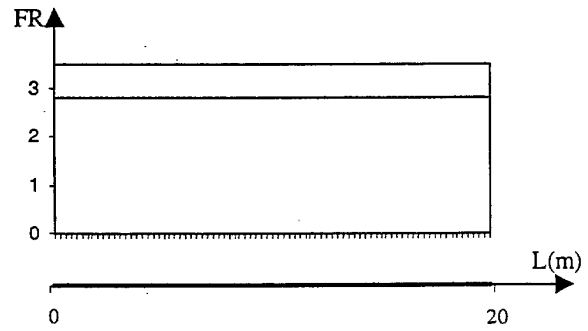


Fig. 14c



Fig. 15a

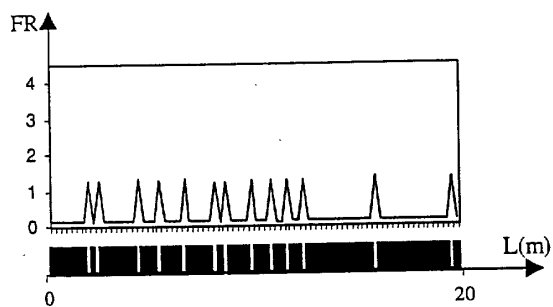


Fig. 15b

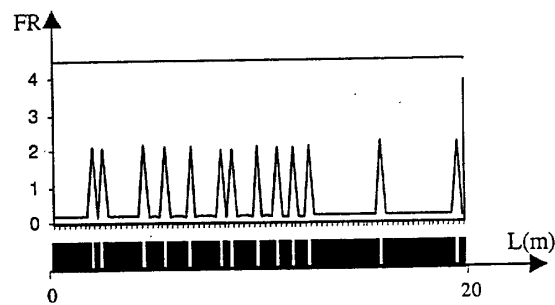


Fig. 15c

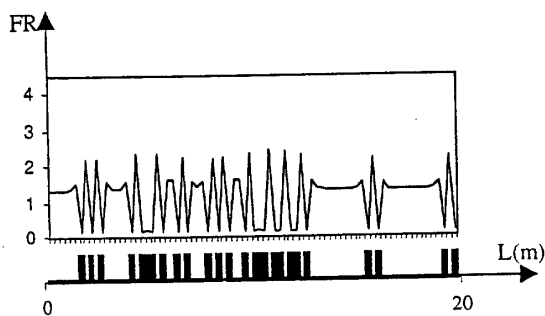


Fig. 15d

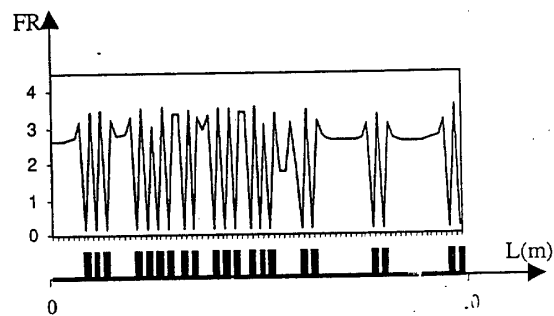


Fig. 15e

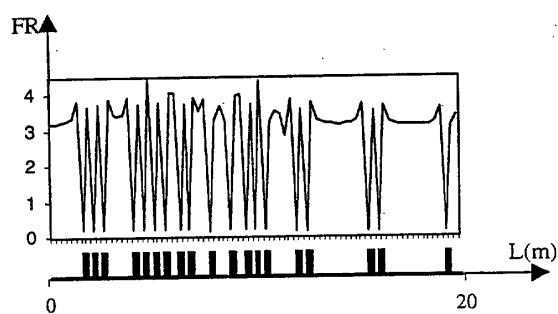


Fig. 15f

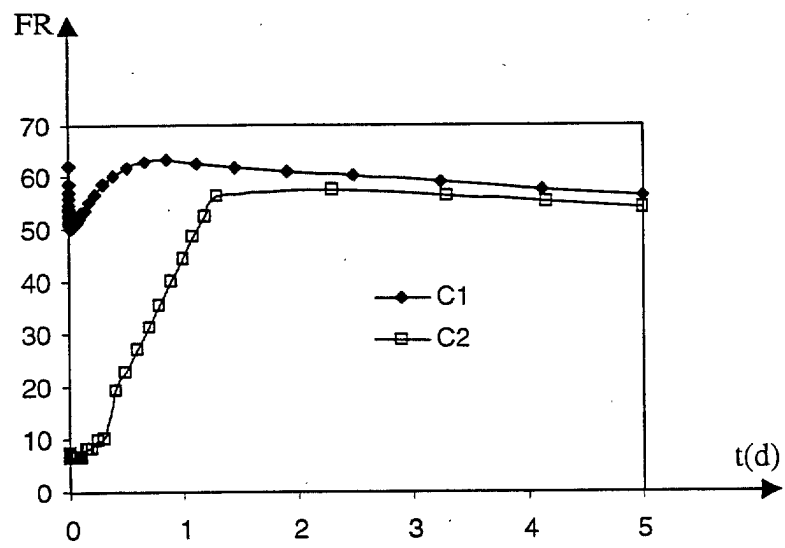


Fig. 16

r (m) NR = 16	θ $N\theta = 1$	x (m) NX = 80
0.00625 0.00625 0.0125 0.025 0.05 0.1 0.2 0.4 0.8 1.6 3.2 6.4 12.8 25. 50. 50. 100. 200. 300. 400. 600.	2π	80x0.25

Fig. 17

Cas 2	
p (bar)	t (jour)
319.5	0.0 - 0.1
319.4	0.1 - 0.2
319.3	0.2 - 0.3
319.2	0.3 - 0.4
319.1	0.4 - 0.5
319.0	0.5 - 0.6
318.9	0.6 - 0.7
318.8	0.7 - 0.8
318.7	0.8 - 0.9
318.6	0.9 - 1.0
318.5	1.0 - 1.1
318.4	1.1 - 1.2
318.3	1.2 - 1.3
318.2	1.3 - 5.0

Fig. 18



Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 02 29 0995

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.CI.7)
T	<p>DING ET AL.: "Modelling of near-wellbore damage removal by natural cleanup in horizontal open hole completed wells, paper SPE-68951"</p> <p>SPE EUROPEAN FORMATION DAMAGE CONFERENCE, 21 mai 2001 (2001-05-21)</p> <p>- 22 mai 2110 (2110-05-22), pages 1-14, XP002187166</p> <p>The Hague, The Netherlands</p> <p>* le document en entier *</p>	1	E21B49/00
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.CI.7)
			E21B
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
LA HAYE		15 août 2002	Rampelmann, K
<p>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul</p> <p>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie</p> <p>A : arrière-plan technologique</p> <p>O : divulgation non-écrite</p> <p>P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention</p> <p>E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date</p> <p>D : cité dans la demande</p> <p>L : cité pour d'autres raisons</p> <p>& : membre de la même famille, document correspondant</p>			

EPO FORM 1503 03 82 (P04002)