



(11) **EP 1 630 348 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:  
**25.07.2007 Bulletin 2007/30**

(51) Int Cl.:  
**E21B 41/00<sup>(2006.01)</sup>**

(21) Numéro de dépôt: **05291700.2**

(22) Date de dépôt: **08.08.2005**

(54) **Méthode de modélisation de la production d'un gisement pétrolier**

Verfahren zur Modellierung der Ölgewinnung aus einer unterirdischen Formation

Method for modelling the production of an oil-bearing formation

(84) Etats contractants désignés:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI SK TR**

(30) Priorité: **30.08.2004 FR 0409177**

(43) Date de publication de la demande:  
**01.03.2006 Bulletin 2006/09**

(73) Titulaire: **Institut Français du Pétrole**  
**92852 Rueil Malmaison Cédex (FR)**

(72) Inventeurs:  
• **Scheidt, Céline**  
**92500 Rueil Malmaison (FR)**

- **Zabalza-Mezghani, Isabelle**  
**92500 Rueil Malmaison (FR)**
- **Collombier, Dominique**  
**54000 Nancy (FR)**
- **Feraille, Mathieu**  
**92000 Nanterre (FR)**

(56) Documents cités:  
**EP-A- 1 441 238 WO-A-00/48022**  
**US-A- 4 969 130 US-A- 5 889 729**  
**US-A- 5 992 519 US-A- 6 108 608**

- **CATHERINE BOGAN ET AL: "Building Reservoir Models Based on 4D Seismic & Well Data in Gulf of Mexico Oil Fields" SPE 84370, 5 octobre 2003 (2003-10-05), pages 1-11, XP002323905**

**EP 1 630 348 B1**

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la date de publication de la mention de la délivrance du brevet européen, toute personne peut faire opposition au brevet européen délivré, auprès de l'Office européen des brevets. L'opposition doit être formée par écrit et motivée. Elle n'est réputée formée qu'après paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

## Description

**[0001]** La présente invention concerne l'étude et l'optimisation des schémas de production des gisements pétroliers. Elle vise à modéliser le comportement d'un gisement pétrolier afin de pouvoir comparer plusieurs schémas de production, et de définir un schéma optimal compte tenu d'un critère de production donné (récupération d'huile, venue d'eau, débit de production...).

**[0002]** L'étude d'un gisement comporte deux phases principales.

**[0003]** La phase de caractérisation du réservoir consiste à déterminer un modèle numérique d'écoulement ou simulateur d'écoulement qui soit compatible avec les données réelles collectées sur le terrain. Les ingénieurs n'ont accès qu'à une infime partie du gisement qu'ils étudient (mesures sur carottes, diagraphies, essais de puits, ...). Ils doivent extrapoler ces données ponctuelles sur la totalité du champ pétrolier pour construire le modèle numérique de simulation.

**[0004]** La phase de prévision de production utilise le modèle numérique de simulation pour estimer les réserves et les productions à venir ou pour améliorer le schéma de production en place. Cette phase est effectuée grâce au modèle numérique de simulation construit à partir de données nombreuses et variées, mais ne provenant que d'une infime partie du gisement. En conséquence, la notion d'incertitude doit être constamment prise en compte.

**[0005]** Afin de bien caractériser l'impact de chaque incertitude sur la production de pétrole, le plus grand nombre de scénarii de production doivent être testés et, par conséquent, un nombre important de simulations de réservoir est nécessaire. Compte tenu du délai important requis pour effectuer une simulation d'écoulement, il ne peut clairement pas être envisagé de tester tous les scénarii possibles via le modèle numérique d'écoulement. Dans ce contexte, l'utilisation de la méthode des plans d'expériences peut permettre la construction d'un modèle simplifié du simulateur d'écoulement en fonction d'un nombre réduit de paramètres. Les plans d'expériences permettent de déterminer le nombre et la localisation dans l'espace des paramètres des simulations à réaliser pour avoir le maximum d'informations pertinentes au coût le plus faible possible. Ce modèle simple traduit le comportement d'une réponse donnée (par exemple le cumulé d'huile produit à 10 ans) en fonction de quelques paramètres. Sa construction nécessite un nombre réduit de simulations, définies au préalable grâce à un plan d'expériences.

**[0006]** Au cours de la phase de prévision de production, le modèle simplifié est utilisé parce qu'il est simple et analytique et, donc, chaque simulation obtenue par ce modèle est immédiate. Cela constitue une économie de temps considérable. L'utilisation de ce modèle autorise l'ingénieur réservoir à tester autant de scénarii qu'il le souhaite, sans se soucier des délais nécessaires pour effectuer une simulation numérique d'écoulement.

**[0007]** Les méthodes présentées par les documents FR 2 855 631, FR 2 855 633 et US-A-6.108.608 utilisent des modèles simplifiés pour optimiser la production d'un gisement pétrolier ou pour aider à la prise de décision pour la gestion d'un gisement pétrolier, en présence d'incertitudes.

**[0008]** Le modèle simplifié obtenu par des plans d'expériences suppose que la réponse obtenue par le modèle est une fonction linéaire des paramètres pris en compte. Cependant, dans la majorité des cas, ce n'est pas vrai. Lorsque l'intervalle dans lequel peut évoluer un paramètre (perméabilité, porosité, ...) est relativement restreint et que sa contribution est raisonnable, on peut supposer que son comportement est linéaire. Mais quand cet intervalle devient trop large ou quand la contribution du paramètre n'est plus linéaire, l'hypothèse de linéarité biaise la connaissance du gisement pétrolier.

**[0009]** Il est donc nécessaire d'établir un critère permettant de détecter les non-linéarités et de mettre en place une méthodologie efficace et rapide permettant de prédire de manière efficace des comportements de réponses non-linéaires.

**[0010]** La présente invention propose de modéliser un gisement pétrolier en procédant par ajustements itératifs afin de reproduire au mieux le comportement du gisement pétrolier, tout en maîtrisant le nombre de simulations.

**[0011]** De manière générale, la présente invention concerne une méthode pour simuler la production d'un gisement pétrolier dans laquelle on effectue les étapes :

- a) on construit un simulateur d'écoulement à partir de données physiques mesurées sur le gisement pétrolier,
  - b) on détermine un premier modèle analytique exprimant la production du gisement en fonction du temps en tenant compte de paramètres ayant une influence sur la production du gisement, le premier modèle s'ajustant au mieux sur un nombre fini de valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement,
  - c) on sélectionne au moins une nouvelle valeur de production associée à un point situé dans un domaine du gisement choisi en fonction de la non linéarité de la production du gisement dans ce domaine, la nouvelle valeur étant obtenue par le simulateur d'écoulement,
  - d) on détermine un deuxième modèle en ajustant le premier modèle de manière à ce que la réponse du deuxième modèle audit point corresponde à la nouvelle valeur de production.
- a) on construit un simulateur d'écoulement à partir de données physiques mesurées sur le gisement pétrolier,
  - b) on détermine un premier modèle analytique exprimant la production du gisement en fonction du temps en tenant compte de paramètres ayant une influence sur la production du gisement, le premier modèle s'ajustant au mieux sur un nombre fini de valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement,

## EP 1 630 348 B1

c) on sélectionne au moins une nouvelle valeur de production associée à un point situé dans un domaine du gisement choisi en fonction de la non linéarité de la production du gisement dans ce domaine, la nouvelle valeur étant obtenue par le simulateur d'écoulement,

5 d) on détermine un deuxième modèle en ajustant le premier modèle de manière à ce que la réponse du deuxième modèle audit point corresponde à la nouvelle valeur de production.

**[0012]** Selon l'invention, à l'étape c), on peut effectuer les étapes suivantes :

- 10 - on détermine un sous-modèle qui s'ajuste au mieux sur ledit nombre fini de valeurs de production, à l'exception d'une valeur test choisie parmi ledit nombre fini de valeurs de production,
- on calcule un résidu de prédiction associé à ladite valeur test en effectuant la différence entre la réponse du sous-modèle et ladite valeur test,
- 15 - on calcule le résidu de prédiction associé à chacune desdites valeurs de prédiction en répétant les deux étapes précédentes en attribuant successivement à la valeur test chacune des valeurs comprises dans ledit nombre fini de valeurs de production,
- on sélectionne la nouvelle valeur de production dans un domaine du gisement voisin du point associé à la valeur de production ayant le plus grand résidu de prédiction.

**[0013]** On peut sélectionner la nouvelle valeur de production en tenant compte du gradient de la production au point associé à la valeur de production ayant le plus grand résidu de prédiction.

**[0014]** De plus, on peut sélectionner une nouvelle valeur à l'étape c) et on peut effectuer l'étape d), à condition que le plus grand résidu de prédiction soit supérieur à une valeur préalablement fixée.

**[0015]** Selon une variante de l'invention, à l'étape c), on peut effectuer les étapes suivantes :

- 25 - on détermine une première variance de krigeage du premier modèle pour ledit nombre fini de valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement,
- on choisit un premier point pilote dans le gisement à l'endroit où la première variance de krigeage est maximale,
- on détermine une deuxième variance de krigeage du premier modèle pour ledit nombre fini de valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement et le premier point pilote,
- 30 - on choisit un deuxième point pilote dans le gisement à l'endroit où la deuxième variance de krigeage est maximale,
- on attribue une valeur à chacun desdits points pilotes en effectuant les cinq opérations suivantes pour chacun des points pilotes :
  - 35 • on détermine un sous-modèle qui s'ajuste au mieux sur le nombre fini de valeurs de production et sur la valeur associée à un des points pilotes, à l'exception d'une valeur test choisie parmi le nombre fini de valeurs de production et la valeur associée au point pilote,
  - on calcule un résidu de prédiction associé à la valeur test en effectuant la différence entre la réponse du sous-modèle et la valeur test,
  - on calcule le résidu de prédiction associé à chacune des réponses du sous-modèle en répétant les deux opérations précédentes en attribuant successivement à la valeur test chacune des valeurs comprises dans l'ensemble consistant en ledit nombre fini de valeurs de production et la valeur associée au point pilote,
  - 40 • on calcule la somme des valeurs absolues des résidus de prédiction calculé pour chacune des valeurs tests,
  - on attribue audit point pilote la valeur qui minimise cette somme
- 45 - on détermine un deuxième sous-modèle qui s'ajuste au mieux sur ledit nombre fini de valeurs de production et sur les valeurs desdits points pilotes,
- pour chacun des points pilotes, on effectue la différence entre la réponse du deuxième sous-modèle et la réponse du premier modèle,
- 50 - on associe ladite nouvelle valeur de production de l'étape c) au point pilote pour lequel ladite différence est la plus grande,

De plus, à l'étape d), on peut déterminer le deuxième modèle en ajustant le premier modèle de manière à ce que la réponse du deuxième modèle audit point pilote sélectionné corresponde à la nouvelle valeur de production et, en outre, aux valeurs attribués aux autres points pilotes.

**[0016]** Selon une autre variante de l'invention, à l'étape c), on peut effectuer les étapes suivantes :

- on détermine un modèle analytique exprimant la dérivée de la production du gisement en fonction du temps, le modèle s'ajustant au mieux sur les dérivées aux points associés auxdites valeurs de production utilisées à l'étape b),

## EP 1 630 348 B1

- à partir du modèle exprimant la dérivée, on sélectionne au moins une nouvelle valeur de production associée à un point dont la réponse du modèle exprimant la dérivée est nulle.

**[0017]** On peut sélectionner une nouvelle valeur à l'étape c) et on peut effectuer l'étape d), à condition que le résidu de prédiction de la nouvelle valeur sélectionnée soit supérieur à une valeur préalablement fixée.

**[0018]** Selon l'invention, après l'étape d), on effectue les étapes suivantes :

- on détermine un troisième modèle analytique exprimant la dérivée de la production du gisement en fonction du temps, le troisième modèle s'ajustant au mieux aux dérivées aux points associés audit nombre fini de valeur de production et à la valeurs de production sélectionnées à l'étape c),
- si la réponse du troisième modèle analytique au point sélectionné à l'étape c) est supérieure à zéro, on détermine un point associé à la valeur maximum de la réponse du deuxième modèle au voisinage du point sélectionné à l'étape c),
- si la réponse du troisième modèle analytique au point sélectionné à l'étape c) est inférieure à zéro, on détermine un point associé à la valeur minimum de la réponse du deuxième modèle au voisinage du point sélectionné à l'étape c),
- on détermine une nouvelle valeur de production par le simulateur d'écoulement au point associé à la valeur minimum ou maximum précédemment déterminée,
- on détermine un quatrième modèle en ajustant le deuxième modèle de manière à ce que la réponse du quatrième modèle corresponde à la nouvelle valeur déterminée à l'étape précédente.

**[0019]** Selon l'invention, on peut répéter les étapes c) et d).

**[0020]** A l'étape b), on peut choisir lesdites valeurs de production en utilisant un plan d'expériences.

**[0021]** A l'étape b), on peut ajuster le premier modèle en utilisant l'une des méthodes d'approximation suivantes : approximation par polynômes, réseaux de neurones, machines à support vectoriel.

**[0022]** A l'étape d), on peut utiliser l'une des méthodes d'interpolation suivantes : méthode du krigeage et méthode des splines.

**[0023]** Ainsi, la méthode selon l'invention fournit à l'ingénieur de réservoir un formalisme simple et peu onéreux en terme de simulations numériques pour la gestion des scénarii et l'optimisation des schémas de production, pour l'aider dans ses prises de décisions afin de minimiser les risques.

**[0024]** D'autres caractéristiques et avantages de l'invention seront mieux compris et apparaîtront clairement à la lecture de la description faite ci-après en se référant aux dessins parmi lesquels :

- la figure 1 schématise la méthode selon l'invention,
- la figure 2 schématise une fonction « chameau » et l'approximation de cette fonction par des modèles obtenus par plans d'expériences,
- la figure 3 schématise l'amélioration de l'approximation de la fonction « chameau », en mettant en oeuvre l'invention.

**[0025]** La méthode selon l'invention est schématisée par le diagramme de la figure 1.

### Etape 1 : construction du simulateur d'écoulement du réservoir

**[0026]** Le gisement pétrolier est modélisé à l'aide d'un simulateur numérique de réservoir. Le simulateur de réservoir ou simulateur d'écoulement permet notamment de calculer la production d'hydrocarbures ou d'eau dans le temps en fonction de paramètres techniques tels que le nombre de couches du réservoir, la perméabilité des couches, la force de l'aquifère, la position des puits de pétrole, etc. En outre, le simulateur d'écoulement calcule la dérivée de la valeur de production au point considéré.

**[0027]** Le simulateur numérique est construit à partir de données caractéristiques du gisement pétrolier. Par exemple, les données sont obtenues par des mesures effectuées en laboratoire sur des carottes et des fluides prélevés sur le gisement pétrolier, par diagraphies, par essais de puits, etc.

### Etape 2 : Approximation du simulateur d'écoulement

**[0028]** Le simulateur d'écoulement étant complexe et gourmand en temps de calcul, on construit un modèle simplifié du comportement du gisement pétrolier.

**[0029]** On sélectionne des paramètres ayant une influence sur les profils de production d'hydrocarbures ou d'eau par le réservoir. La sélection des paramètres peut se faire soit par rapport à la connaissance physique du gisement pétrolier, soit par une étude de sensibilité. Par exemple, on peut mettre en oeuvre un test statistique de Student ou de Fischer.

**[0030]** Des paramètres peuvent être intrinsèques au réservoir pétrolier. Par exemple, on peut considérer les paramè-

tres suivants : un multiplicateur de perméabilité pour certaines couches du réservoir, la force de l'aquifère, la saturation d'huile résiduelle après balayage à l'eau.

**[0031]** Des paramètres peuvent correspondre à des options de développement du gisement. Ces paramètres peuvent être la position d'un puits, le niveau de complétion, la technique de forage.

**[0032]** On sélectionne des points dans le domaine expérimental pour lesquels les simulations numériques d'écoulement vont être effectuées. Ces points servent à construire un modèle simplifié qui reproduit au mieux le simulateur d'écoulement du gisement. Ces points sont choisis par la méthode des plans d'expériences, qui permet de déterminer le nombre et la localisation des simulations à réaliser pour avoir le maximum d'information au prix le plus faible possible et, ainsi, déterminer un modèle fiable reflétant au mieux le profil de production. Il faut remarquer que le choix de ce dispositif expérimental est très important : le plan d'expériences initial a un rôle primordial dans l'élaboration de la modélisation du premier modèle, les résultats dépendent fortement de la disposition des expérimentations.

**[0033]** Le choix des points de simulation peut être réalisé grâce à différents types de plans d'expériences, par exemple, les plans factoriels, les plans composites, les Hypercubes Latin, les plans de distance maximin, etc. Il est possible d'utiliser les plans d'expériences décrits par les documents suivants :

1. Dejean, J.P. and Blanc, G., "Managing uncertainties on production predictions using integrated statistical methods", SPE 56696, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, oct. 3-6, 1999.
2. Box, G.E.P. and Hunter, J.S., "The 2k-p fractional factorial designs", Part I, Technometrics, 2, 311-352, 1961a
3. Box, G.E.P. and Hunter, J.S., "The 2k-p fractional factorial designs", Part II, Technometrics, 3, 449-458, 1961b
4. Box, G.E.P and Wilson, K.B., "On the experimental attainment of optimum conditions", Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 13, 1-45
5. Draper, N. R., "Small composite designs", Technometrics, 27, 173-180, 1985
6. Atkinson, A.C. and Donev, A.N., "Optimum experimental designs", Oxford University press, 1992

**[0034]** Après la construction de ce premier plan d'expériences et lorsque les simulations numériques sont réalisées, une méthode d'approximation est utilisée pour déterminer un premier modèle qui donne une tendance du comportement de la fonction réponse, c'est-à-dire qui approche le simulateur d'écoulement.

**[0035]** Le premier modèle exprime un critère de production étudié au cours du temps, ce critère étant exprimé en fonction des paramètres sélectionnés. Le critère de production peut être la récupération d'huile, la venue d'eau, le débit de production. Le premier modèle analytique est construit en utilisant les valeurs de ce critère préalablement sélectionnées et obtenues au moyen du simulateur d'écoulement.

**[0036]** Par méthode d'approximation, nous entendons considérer des polynômes du premier ou du deuxième ordre, des réseaux de neurones, des machines à support vectoriel ou éventuellement des polynômes d'ordre supérieur à deux. Le choix de ce modèle dépend d'une part du nombre de simulations maximum envisageable par l'utilisateur et d'autre part, du plan d'expériences initial utilisé.

### Etape 3 : Ajustement du premier modèle

**[0037]** Il peut exister un écart entre la valeur de production donnée par le premier modèle analytique obtenu à l'étape 2 et les valeurs de productions simulées utilisées pour construire ce premier modèle.

**[0038]** Dans ce cas, on détermine les résidus aux différents points de simulations. Les résidus correspondent à la différence entre la réponse du premier modèle et la valeur obtenue par le simulateur d'écoulement du réservoir. Ensuite, les résidus sont interpolés. Toute méthode d'interpolation en n dimensions peut convenir. On peut envisager, en particulier, la méthode du krigeage ou des splines. Ces méthodes sont expliquées dans l'ouvrage intitulé « Statistics for spatial Data » de Cressie, N., Wiley, New-York 1991.

**[0039]** La structure d'interpolation des résidus se prête bien à cette approche séquentielle car elle se décompose en deux parties : un modèle linéaire, qui correspond au premier modèle déterminé à l'étape 2, et un terme "correcteur" qui permet de combler l'écart entre la prédiction du premier modèle et le point de simulation. Dans le cas où le modèle analytique serait satisfaisant, il n'est pas nécessaire d'ajouter ce terme "correcteur". Dans le cas contraire, il permet d'interpoler les réponses et, ainsi, de prendre en compte les non-linéarités détectées de la surface.

**[0040]** Ainsi, on détermine un deuxième modèle ajusté en ajoutant les résultats de l'interpolation des résidus au premier modèle déterminé à l'étape 2.

### Etape 4: Test de prédictivité du modèle et choix de points de simulation supplémentaires

**[0041]** A ce stade de la modélisation, le deuxième modèle interpole exactement les simulations, donc l'ajustement de la fonction réponse est optimal. Etant donné que la méthode d'interpolation est exacte, les résidus « classiques » sont nuls. Donc, selon l'invention on s'intéresse aux résidus de prédiction. De ce fait, on examine la prédictivité du

modèle pour les points hors du plan d'expériences. Les prédictions doivent être les plus précises possibles. Par conséquent, un test de la prédictivité du modèle est ensuite réalisé afin d'évaluer la qualité de l'approximation pour juger de la nécessité d'une amélioration par l'ajout de nouveaux points au plan initial.

**[0042]** Par test de la prédictivité, nous entendons deux critères :

- le calcul de la prédictivité a priori avec le calcul des résidus de prédiction
- le calcul de la prédictivité a posteriori avec l'utilisation de points de confirmation.

#### Prédictivité a priori

**[0043]** Les résidus de prédiction sont les résidus obtenus en un point du plan en effectuant l'ajustement du premier modèle sans ce point. Le fait de supprimer un point et de refaire l'estimation du modèle va permettre de déterminer si ce point (ou la zone du plan proche de ce point) apporte une information décisive ou non. Le calcul de ces résidus de prédiction est effectué pour chaque point du plan d'expérience initial. Au voisinage des points jugés les moins prédictifs du plan courant, c'est-à-dire les points ayant le plus grand résidu de prédiction, de nouveaux points sont simulés. Pour ce faire, une zone de sous-échantillonnage est définie au voisinage des points. L'ajout de ces points peut être conditionné par le fait que les résidus soient supérieurs à une valeur fixée par l'utilisateur.

**[0044]** La taille de cette zone de sous-échantillonnage peut être définie en utilisant l'information sur les gradients de la production aux points et/ou la valeur des résidus de prédiction. En effet, une forte valeur de gradient traduit une forte variation de la réponse. Il peut donc être informatif d'ajouter un nouveau point proche de celui existant. Par contre, une faible valeur de gradient dans une direction donnée indique qu'il n'y a pas d'irrégularités dans cette direction. Donc, il n'est pas nécessaire d'investiguer une grande plage de variation dans cette direction. A contrario, la plage de variation pour un des paramètres est d'autant plus grande que la valeur du gradient est importante dans cette direction. Cette approche permet d'éliminer certaines directions (celles où la valeur du gradient n'est pas significative) et, donc, de réduire le nombre de simulations à effectuer. Ce sous échantillonnage peut, par exemple, résulter de la construction d'un nouveau plan d'expériences défini sur cette zone. Le choix de ce plan d'expériences (plan factoriel, plan composite, Hypercube latin) résulte du compromis nécessaire entre le coût et la qualité de modélisation.

**[0045]** Alternativement, on peut mettre en oeuvre la méthode des points pilotes pour améliorer le deuxième modèle.

**[0046]** Pour un nombre d'expérimentations données, il existe un grand nombre d'estimateurs (interpolateurs exacts) passant par toutes les expérimentations et respectant la structure spatiale (espérance et covariance) du processus. Dans cette classe d'estimateurs respectant les données, nous cherchons l'estimateur qui maximise la prédictivité a priori. Afin de parcourir cette classe d'estimateurs, nous procédons à l'ajout d'information fictive, c'est-à-dire que nous rajoutons des points pilotes aux expérimentations simulées. Ces points pilotes sont ensuite considérés comme des données bien qu'aucune simulation n'ait été réalisée et vont permettre de parcourir l'ensemble des estimateurs passant par toutes les expérimentations. L'objectif est de sélectionner l'interpolateur qui maximise le coefficient de prédictivité a priori du modèle, c'est-à-dire que les points pilotes sont positionnés de manière à obtenir la réalisation de prédictivité maximale.

**[0047]** L'emplacement d'un point pilote est déterminé en tenant compte des deux critères suivants :

- la capacité du point pilote à réduire l'écart entre les observations et les résultats de simulation numériques d'écoulement
- la contribution du point pilote dans la réduction des incertitudes sur le modèle d'approximation courant.

**[0048]** Pour que ce choix soit fait de façon optimale, il faut pouvoir quantifier l'impact d'un éventuel point pilote sur chacun des deux critères.

**[0049]** Afin de lever l'incertitude de la prédiction qui règne sur les endroits peu représentés, il est intéressant d'appliquer des perturbations locales sur les zones où la variance de krigeage est importante (absence d'observations). Un point pilote est donc placé là où la variance de krigeage est maximale. Des méthodes pour déterminer la variance de krigeage sont explicitées dans l'ouvrage intitulé « Statistics for spatial Data » de Cressie, N., Wiley, New-York 1991.

**[0050]** Pour déterminer l'emplacement d'un point pilote on effectue les opérations suivantes :

- on détermine la variance de krigeage sur le domaine incertain du deuxième modèle déterminé à l'étape 3 pour le nombre fini de valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement,
- on place un premier point pilote là où la variance de krigeage est maximale

**[0051]** Supposons qu'outre les valeurs de production obtenue par le simulateur d'écoulement, un certain nombre de points pilotes aient déjà été positionnés dans le domaine incertain et que l'on cherche à placer de nouveaux points pilotes pour améliorer la prédictivité du modèle. On assimile alors les points pilotes existants à des données locales de

## EP 1 630 348 B1

variance nulle. C'est pour tenir compte de l'emplacement de points déjà existant que nous optimisons l'emplacement des points pilotes de manière séquentielle.

**[0052]** Ainsi, pour déterminer l'emplacement d'un deuxième point pilote, on effectue les opérations suivantes :

- 5 - on détermine la variance de krigeage du premier modèle pour le nombre fini de valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement et le premier point pilote,
- on détermine l'emplacement d'un deuxième point pilote là où la variance de krigeage est maximale.

**[0053]** On peut ajouter plusieurs points pilotes en répétant les deux opérations précédentes.

10 **[0054]** De préférence, on choisit d'ajouter un nombre de points pilotes inférieur ou égal au nombre d'expériences réelles en présence, afin de ne pas trop perturber le modèle. Une fois que l'emplacement optimal des points pilotes est déterminé, il faut attribuer une valeur "fictive" de réponse en ces points.

15 **[0055]** L'ajout des points pilotes ayant pour objectif d'améliorer la prédictivité a priori du modèle, il faut donc définir la valeur des points pilotes à partir d'une fonction objectif qui mesure cette prédictivité. Etant donné que le krigeage est une méthode d'interpolation exacte, les résidus "classiques" sont nuls. Ils n'apportent donc aucune information sur la prédictivité, et par conséquent, on considère les résidus de prédiction. Par prédictivité a priori, nous entendons le calcul des résidus de prédiction en chacun des points du plan d'expériences initial. Les résidus de prédiction sont les résidus obtenus en un point du plan d'expériences initial en effectuant l'ajustement du premier modèle sans ce point.

20 **[0056]** Pour déterminer la valeur de production associée à un des points pilotes dont l'emplacement a été préalablement déterminé, on peut effectuer les étapes suivantes:

- on détermine un sous-modèle qui s'ajuste sur le nombre fini de valeurs de production et sur la valeur associée au point pilote, à l'exception d'une valeur test choisie parmi le nombre fini de valeurs de production et la valeur associée au point pilote,
- 25 - on calcule un résidu de prédiction associé à la valeur test en effectuant la différence entre la réponse du sous-modèle et cette valeur test,
- on calcule le résidu de prédiction associé à chacune des réponses du sous-modèle de prédiction en répétant les deux étapes précédentes en attribuant successivement à la valeur test chacune des valeurs comprises dans le nombre fini de valeurs de production et la valeur associée au point pilote,
- 30 - on calcule la somme des valeurs absolues ou des carrés des résidus de prédiction déterminé pour chacune des valeurs test
- on attribue au point pilote la valeur qui minimise cette somme.

35 **[0057]** Le fait de supprimer un point et de refaire l'estimation du modèle permet de déterminer si le point ou la zone du domaine expérimental proche de ce point apportent une information décisive ou non. Le calcul des résidus de prédiction est effectué dans un voisinage du point pilote à optimiser. Nous fixons des valeurs initiales pour les points pilotes puis nous considérons ces données comme réelles et nous faisons varier la valeur du point pilote pour obtenir un modèle qui soit le plus prédictif possible, c'est-à-dire que nous voulons minimiser l'erreur de prédiction moyenne du modèle.

40 **[0058]** La détermination de la valeur optimale du point pilote est ainsi réalisée pour minimiser l'erreur de prédiction moyenne du modèle sur l'ensemble du domaine incertain. De même, cette détermination de la valeur optimale du point pilote peut être réalisée de manière à minimiser l'erreur de prédiction locale du modèle (c'est-à-dire dans un voisinage du point pilote, indépendamment des autres erreurs de prédiction).

45 **[0059]** Une fois que la valeur et la position des points pilotes sont déterminés, on teste la sensibilité du modèle aux nouveaux points ajoutés, puis on effectue des simulations aux points qui semblent très sensibles dans l'approximation. Pour cela, on compare l'estimateur obtenu sans points pilotes à l'estimateur obtenu par krigeage avec points pilotes (i.e. la réalisation de prédictivité maximale).

50 **[0060]** Les points pour lesquels on trouve le plus grand désaccord, i.e. là où la différence est la plus importante, traduisent une forte instabilité de l'approximation. Par conséquent, il est indispensable d'améliorer la qualité de l'approximation en ces endroits. Ainsi, les simulations correspondant aux points de plus fort désaccords sont effectuées afin de stabiliser l'approximation.

**[0061]** Pour sélectionner les points pilotes pour lesquels on va effectuer une simulation, on peut effectuer les étapes suivantes :

- 55 - on détermine un sous-modèle à partir des points pilotes et du nombre fini de valeurs de production,
- pour chacun des points pilotes, on effectue la différence entre la réponse de ce sous-modèle et la réponse du deuxième modèle déterminé à l'étape 3,

Selon une première variante :

on sélectionne le point pilote pour lequel la différence entre la réponse du sous-modèle et la réponse du deuxième modèle est la plus grande. C'est le point choisi pour améliorer le premier modèle, les autres points pilotes sont alors ignorés dans la suite du processus.

5 Selon une deuxième variante :

on sélectionne un ou plusieurs points pilotes pour lesquels la prédictivité est la plus mauvaise (inférieure à un seuil plus petit que 1), puisque cette faible prédictivité traduit une forte sensibilité du point. Dans la suite du processus, on prend en compte, d'une part, les valeurs de productions associées aux points pilotes sélectionnés, ces valeurs de production étant obtenues par le simulateur d'écoulement et, d'autre part, les valeurs de productions associées aux autres points pilotes dont la prédictivité est meilleure, ces valeurs de production correspondant aux valeurs estimées selon la prédictivité a priori mentionnée ci-dessus.

Selon la deuxième variante, si on réitère le processus, il convient ensuite de réévaluer la prédictivité locale aux points pilotes non simulés, pour s'assurer que cette valeur correspond toujours à une stabilisation satisfaisante. Si tel n'est pas le cas, le point pilote non simulé n'est plus considéré dans la nouvelle estimation.

15 **[0062]** L'ajout de ces nouvelles simulations permet ensuite la réalisation d'une étude des résidus. Par résidus ici, nous entendons, pour chaque point pilote, la différence entre la valeur simulée et la valeur obtenue lors de l'optimisation des points pilotes :

**[0063]** Comme précédemment, si les résidus sont grands, il y a un désaccord entre l'approximation courante avec les points pilotes et les simulations; ceci traduit un défaut de prédictivité du modèle. Dans ce cas, une amélioration du modèle courant est nécessaire, ceci passe à nouveau par la réalisation de nouvelles simulations. Il faut donc procéder à une ou plusieurs nouvelles itérations.

20 **[0064]** Par contre, si les résidus sont faibles, la prédiction en ces points est bonne et donc le modèle semble prédictif dans les domaines considérés. Mais, la prédictivité globale du modèle demande confirmation, pour cela nous proposons de rajouter des points de confirmation. Ces nouvelles simulations permettent de déterminer s'il faut continuer ou non le processus d'itération.

#### Prédictivité a posteriori

30 **[0065]** On peut ajouter des points de confirmation, c'est à dire des valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement construit à l'étape 1, au plan d'expériences en examinant la dérivée des valeurs de production. En effet, un critère d'ajout de simulations peut être basé sur : la valeur de la dérivée des valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement, l'identification directe de points dont la valeur de production est maximale ou de l'identification directe de points dont la valeur de production est minimale.

35 **[0066]** On détermine un modèle qui approche les valeurs des dérivées aux points choisis par le plan d'expériences à l'étape 2. Puis, on ajoute un nouveau point de simulation à l'endroit où la réponse du modèle de dérivée s'annule, à condition que ce point soit suffisamment distant des simulations déjà effectuées. Ces points de confirmation permettent de tester la prédictivité du deuxième modèle, dans cette nouvelle zone investiguée. Si les résidus de prédiction calculés aux nouveaux points sélectionnés, dépassent une valeur fixée par l'utilisateur, ces nouveaux points sont utilisés pour effectuer une nouvelle phase d'interpolation.

40 **[0067]** L'ajout de simulations au dispositif courant, qu'il soit la conséquence d'un manque de prédictivité a priori ou a posteriori permet d'augmenter la qualité et la quantité de l'information sur la fonction réponse pour obtenir ainsi un échantillonnage plus représentatif.

#### Etape 5 : Construction et ajustement d'un troisième modèle

45 **[0068]** A partir du deuxième modèle déterminé à l'étape 2, on détermine les résidus aux nouveaux points de simulations sélectionnés à l'étape 4. Les résidus correspondent à la différence entre la réponse du premier modèle et la valeur de simulation obtenue par le simulateur d'écoulement du réservoir. Ensuite, les résidus sont interpolés. Toute méthode d'interpolation en n dimensions peut convenir. Par exemple, on peut utiliser le krigeage ou les splines.

50 **[0069]** La structure d'interpolation des résidus se décompose en deux parties : le premier modèle déterminé à l'étape 2, et un terme "correcteur" qui permet de combler l'écart entre la prédiction du premier modèle et la ou les nouvelles simulations sélectionnées à l'étape 4. La nouvelle simulation permet d'interpoler les réponses et, ainsi, de prendre en compte les non-linéarités détectées de la surface.

55 **[0070]** On détermine un deuxième modèle ajusté en ajoutant les résultats de l'interpolation des résidus au premier modèle déterminé à l'étape 2.

Itération

[0071] En outre, selon l'invention, il est possible d'améliorer le modèle de manière itérative en répétant les étapes 4 et 5.

5 [0072] Dans ce cas, lors de la nouvelle étape 4, on ajoute des points de simulations par rapport au modèle déterminé lors de la précédente étape 5. Et lors de la nouvelle étape 5, on construit et on ajuste un nouveau modèle en partant des points de simulations sélectionnés lors de la nouvelle étape 4 et en ajustant le premier modèle déterminé lors de l'étape 2.

Etape 6 : Recherche de points d'inflexion

10 [0073] Dans le cas où l'on a utilisé la méthode a posteriori à l'étape 4, on peut améliorer le modèle déterminé à l'étape 5 en ajoutant des points de simulation en effectuant les étapes suivantes :

- 15 - on détermine un modèle analytique exprimant la dérivée de la production du gisement en fonction du temps, le modèle s'ajustant au mieux sur les dérivées aux points associés aux valeurs de production sélectionnées aux étapes 2 et 4,
- on vérifie qu'au point ajouté à l'étape 4, la réponse du modèle analytique exprimant la dérivée de la production du gisement est nulle si cette réponse est supérieure à 0, on détermine le maximum du troisième modèle déterminé à l'étape 5 situé au voisinage du point ajouté à l'étape 4,
- 20 si cette réponse est inférieure à 0, on détermine le minimum du troisième modèle déterminé à l'étape 5 situé au voisinage du point ajouté à l'étape 4
- on détermine la valeur du minimum ou du maximum par le simulateur d'écoulement
- on détermine un nouveau modèle en ajustant le troisième modèle de manière à ce que la réponse du nouveau modèle corresponde à la nouvelle valeur minimum ou maximum obtenue par le simulateur d'écoulement.

25 [0074] L'intérêt de la méthode selon l'invention est illustré ci-après en référence aux figures 2 et 3.

[0075] La fonction analytique fortement non-linéaire étudiée comporte deux paramètres x et y afin de mieux visualiser les résultats. Il s'agit de la fonction "chameau", qui est caractérisée par sa forte non-linéarité. L'expression de cette fonction est la suivante :

30

$$F(x, y) = 4x^4 - \frac{21}{10}x^4 + \frac{1}{3}x^6 + xy - 4y^2 + 4y^4$$

35 [0076] Elle est représentée graphiquement, dans le cube unité  $[-1, 1]^2$  référencé A sur la figure 2.

[0077] La référence B de la figure 2 présente le graphe de l'estimation de la fonction « chameau » par un modèle linéaire obtenu à partir d'un plan factoriel à 4 simulations. La référence C de la figure 2 représente le graphe de l'estimation de la fonction « chameau » par un modèle polynomial du second ordre obtenu à partir d'un plan composite centré à 9 simulations.

[0078] La disparité des résultats entre d'une part la fonction à modéliser (cube A) et d'autre part les modèles (cubes B et C) confirment bien les limites de la théorie des plans d'expériences classiques pour modéliser des fonctions non-linéaires.

45 [0079] La figure 3 illustre l'optimisation, selon notre invention, du modèle approchant la fonction « chameau ». La fonction représentée dans le cube unité  $[-1, 1]^2$  référencée D est obtenue en effectuant les étapes 2) et 3), à partir d'un Hypercube Latin de distance maximin initial contenant neuf essais. Ensuite, les fonctions représentées dans le cube unité  $[-1, 1]^2$  référencés E, F et G sont obtenues en ajustant cette fonction obtenue à partir d'un Hypercube Latin et en ajoutant sept points de simulations. Les étapes 4) et 5) sont répétées trois fois.

50 [0080] En comparant la fonction référencée G sur la figure 3 par rapport à la fonction « chameau » référencée A sur la figure 2, on constate que les courbes sont relativement proches, les non-linéarités ont bien été détectées. La méthode évolutive, selon l'invention, est bien adaptée et les résultats sont très satisfaisants.

**Revendications**

55

1. Méthode pour simuler la production d'un gisement pétrolier, dans laquelle on effectue les étapes :
  - a) on construit un simulateur d'écoulement à partir de données physiques mesurées sur le gisement pétrolier,

## EP 1 630 348 B1

b) on détermine un premier modèle analytique exprimant la production du gisement en fonction du temps en tenant compte de paramètres ayant une influence sur la production du gisement, le premier modèle s'ajustant au mieux sur un nombre fini de valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement,  
c) on sélectionne au moins une nouvelle valeur de production associée à un point situé dans un domaine du gisement choisi en fonction de la non linéarité de la production du gisement dans ce domaine, la nouvelle valeur étant obtenue par le simulateur d'écoulement,  
d) on détermine un deuxième modèle en ajustant le premier modèle de manière à ce que la réponse du deuxième modèle audit point corresponde à la nouvelle valeur de production.

2. Méthode selon la revendication 1, dans laquelle, à l'étape c), on effectue les étapes suivantes :

- on détermine un sous-modèle qui s'ajuste au mieux sur ledit nombre fini de valeurs de production, à l'exception d'une valeur test choisie parmi ledit nombre fini de valeurs de production,
- on calcule un résidu de prédiction associé à ladite valeur test en effectuant la différence entre la réponse du sous-modèle et ladite valeur test,
- on calcule le résidu de prédiction associé à chacune desdites valeurs de prédiction en répétant les deux étapes précédentes en attribuant successivement à la valeur test chacune des valeurs comprises dans ledit nombre fini de valeurs de production,
- on sélectionne la nouvelle valeur de production dans un domaine du gisement voisin du point associé à la valeur de production ayant le plus grand résidu de prédiction.

3. Méthode selon la revendication 2, dans laquelle on sélectionne la nouvelle valeur de production en tenant compte du gradient de la production au point associé à la valeur de production ayant le plus grand résidu de prédiction.

4. Méthode selon l'une des revendications 2 et 3, dans laquelle on sélectionne une nouvelle valeur à l'étape c) et on effectue l'étape d), à condition que le plus grand résidu de prédiction soit supérieur à une valeur préalablement fixée.

5. Méthode selon la revendication 1, dans laquelle à l'étape c), on effectue les étapes suivantes :

- on détermine une première variance de krigeage du premier modèle pour ledit nombre fini de valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement,
- on choisit un premier point pilote dans le gisement à l'endroit où la première variance de krigeage est maximale,
- on détermine une deuxième variance de krigeage du premier modèle pour ledit nombre fini de valeurs de production obtenues par le simulateur d'écoulement et le premier point pilote,
- on choisit un deuxième point pilote dans le gisement à l'endroit où la deuxième variance de krigeage est maximale,
- on attribue une valeur à chacun desdits points pilotes en effectuant les cinq opérations suivantes pour chacun des points pilotes :

- on détermine un sous-modèle qui s'ajuste au mieux sur le nombre fini de valeurs de production et sur la valeur associée à un des points pilotes, à l'exception d'une valeur test choisie parmi le nombre fini de valeurs de production et la valeur associée au point pilote,
- on calcule un résidu de prédiction associé à la valeur test en effectuant la différence entre la réponse du sous-modèle et la valeur test,
- on calcule le résidu de prédiction associé à chacune des réponses du sous-modèle en répétant les deux opérations précédentes en attribuant successivement à la valeur test chacune des valeurs comprises dans l'ensemble consistant en ledit nombre fini de valeurs de production et la valeur associée au point pilote,
- on calcule la somme des valeurs absolues des résidus de prédiction calculé pour chacune des valeurs tests,
- on attribue audit point pilote la valeur qui minimise cette somme

- on détermine un deuxième sous-modèle qui s'ajuste au mieux sur ledit nombre fini de valeurs de production et sur les valeurs desdits points pilotes,
- pour chacun des points pilotes, on effectue la différence entre la réponse du deuxième sous-modèle et la réponse du premier modèle,
- on associe ladite nouvelle valeur de production de l'étape c) au point pilote pour lequel ladite différence est la plus grande,

6. Méthode selon la revendication 5, dans laquelle à l'étape d), on détermine le deuxième modèle en ajustant le premier

## EP 1 630 348 B1

modèle de manière à ce que la réponse du deuxième modèle audit point pilote sélectionné corresponde à la nouvelle valeur de production et, en outre, aux valeurs attribués aux autres points pilotes.

7. Méthode selon l'une des revendications 1 à 6, dans laquelle à l'étape c), on effectue les étapes suivantes :

- on détermine un modèle analytique exprimant la dérivée de la production du gisement en fonction du temps, le modèle s'ajustant au mieux sur les dérivées aux points associés auxdites valeurs de production utilisées à l'étape b),
- à partir du modèle exprimant la dérivée, on sélectionne au moins une nouvelle valeur de production associée à un point dont la réponse du modèle exprimant la dérivée est nulle.

8. Méthode selon la revendication 7, dans laquelle on sélectionne une nouvelle valeur à l'étape c) et on effectue l'étape d), à condition que le résidu de prédiction de la nouvelle valeur sélectionnée soit supérieur à une valeur préalablement fixée.

9. Méthode selon l'une des revendications 7 et 8, dans lequel après l'étape d), on effectue les étapes suivantes:

- on détermine un troisième modèle analytique exprimant la dérivée de la production du gisement en fonction du temps, le troisième modèle s'ajustant au mieux aux dérivées aux points associés audit nombre fini de valeur de production et à la valeurs de production sélectionnées à l'étape c),
- si la réponse du troisième modèle analytique au point sélectionné à l'étape c) est supérieure à zéro, on détermine un point associé à la valeur maximum de la réponse du deuxième modèle au voisinage du point sélectionné à l'étape c),
- si la réponse du troisième modèle analytique au point sélectionné à l'étape c) est inférieure à zéro, on détermine un point associé à la valeur minimum de la réponse du deuxième modèle au voisinage du point sélectionné à l'étape c),
- on détermine une nouvelle valeur de production par le simulateur d'écoulement au point associé à la valeur minimum ou maximum précédemment déterminée,
- on détermine un quatrième modèle en ajustant le deuxième modèle de manière à ce que la réponse du quatrième modèle corresponde à la nouvelle valeur déterminée à l'étape précédente.

10. Méthode selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle on répète les étapes c) et d).

11. Méthode selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle, à l'étape b), on choisit lesdites valeurs de production en utilisant un plan d'expériences.

12. Méthode selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle, à l'étape b), on ajuste le premier modèle en utilisant l'une des méthodes d'approximation suivantes : approximation par polynômes, réseaux de neurones, machines à support vectoriel.

13. Méthode selon l'une des revendications précédentes, dans laquelle à l'étape d), on utilise l'une des méthodes d'interpolation suivantes : méthode du krigeage et méthode des splines.

### Claims

1. A method for simulating the production of an oil reservoir, wherein the following stages are carried out:

- a) constructing a flow simulator from physical data measured in the oil reservoir,
- b) determining a first analytical model expressing the production of the reservoir as a function of time by taking account of parameters having an influence on the production of the reservoir, the first model best adjusting to a finite number of production values obtained by the flow simulator,
- c) selecting at least one new production value associated with a point located in an area of the reservoir selected as a function of the non-linearity of the reservoir production in this area, this new value being obtained by the flow simulator,
- d) determining a second model by adjusting the first model so that the response of the second model at said point corresponds to the new production value.

2. A method as claimed in claim 1 wherein, in stage c), the following stages are carried out:

- determining a sub-model that best adjusts to said finite number of production values, except for a test value selected from among said finite number of production values,
- calculating a prediction residue associated with said test value by carrying out the difference between the response of the sub-model and said test value,
- calculating the prediction residue associated with each one of said prediction values by repeating the previous two stages by assigning successively to the test value each one of the values contained within said finite number of production values,
- selecting the new production value in an area of the reservoir close to the point associated with the production value having the greatest prediction residue.

3. A method as claimed in claim 2, wherein the new production value is selected by taking account of the production gradient at the point associated with the production value having the greatest prediction residue.

4. A method as claimed in any one of claims 2 and 3, wherein a new value is selected in stage c) and stage d) is carried out, provided that the greatest prediction residue is greater than a previously set value.

5. A method as claimed in claim 1 wherein, in stage c), the following stages are carried out:

- determining a first kriging variance of the first model for said finite number of production values obtained by the flow simulator,
- selecting a first pilot point in the reservoir in the place where the first kriging variance is maximum,
- determining a second kriging variance of the first model for said finite number of production values obtained by the flow simulator and the first pilot point,
- selecting a second pilot point in the reservoir in the place where the second kriging variance is maximum,
- assigning a value to each one of said pilot points by carrying out the following five operations for each pilot point:

- determining a sub-model that best adjusts to the finite number of production values and to the value associated with one of the pilot points, except for a test value selected from among the finite number of production values and the value associated with the pilot point,
- calculating a prediction residue associated with the test value by carrying out the difference between the response of the sub-model and the test value,
- calculating the prediction residue associated with each one of the sub-model responses by repeating the previous two operations by assigning successively to the test value each one of the values contained in the set consisting of said finite number of production values and the value associated with the pilot point,
- calculating the sum of the absolute values of the prediction residues calculated for each test value,
- assigning to said pilot point the value that minimizes this sum,

- determining a second sub-model that best adjusts to said finite number of production values and to the values of said pilot points,
- for each pilot point, carrying out the difference between the response of the second sub-model and the response of the first model,
- associating said new production value of stage c) with the pilot point for which said difference is the greatest.

6. A method as claimed in claim 5 wherein, in stage d), the second model is determined by adjusting the first model so that the response of the second model at said pilot point selected corresponds to the new production value and, furthermore, to the values assigned to the other pilot points.

7. A method as claimed in any one of claims 1 to 6 wherein, in stage c), the following stages are carried out:

- determining an analytical model expressing the derivative of the reservoir production as a function of time, the model best adjusting to the derivatives at the points associated with said production values used in stage b),
- from the model expressing the derivative, selecting at least one new production value associated with a point whose response of the model expressing the derivative is zero.

8. A method as claimed in claim 7, wherein a new value is selected in stage c) and stage d) is carried out, provided that the prediction residue of the new value selected is greater than a previously set value.

9. A method as claimed in any one of claims 7 and 8 wherein, after stage d), the following stages are carried out:

- determining a third analytical model expressing the derivative of the reservoir production as a function of time, the third model best adjusting to the derivatives at the points associated with said finite number of production values and the production values selected in stage c),
- if the response of the third analytical model at the point selected in stage c) is greater than zero, determining a point associated with the maximum value of the response of the second model in the vicinity of the point selected in stage c),
- if the response of the third analytical model at the point selected in stage c) is less than zero, determining a point associated with the minimum value of the response of the second model in the vicinity of the point selected in stage c),
- determining a new production value by the flow simulator at the point associated with the previously determined minimum or maximum value,
- determining a fourth model by adjusting the second model so that the response of the fourth model corresponds to the new value determined in the previous stage.

10. A method as claimed in any one of the previous claims wherein stages c) and d) are repeated.

11. A method as claimed in any one of the previous claims wherein, in stage b), said production values are selected using an experimental design.

12. A method as claimed in any one of the previous claims wherein, in stage b), the first model is adjusted using one of the following approximation methods: polynomial approximation, neural networks, support vector machines.

13. A method as claimed in any one of the previous claims wherein, in stage d), one of the following interpolation methods is used: kriging method and spline method.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Simulation der Produktion einer Erdöllagerstätte, wobei die folgenden Schritte ausgeführt werden:

- a) Es wird ein Abfluss-Simulator aus physikalischen Daten konstruiert, die an der Erdöllagerstätte gemessen wurden,
- b) Bestimmen eines ersten analytischen Modells, das die Produktion der Lagerstätte in Abhängigkeit von der Zeit ausdrückt, unter Berücksichtigung der Parameter, die einen Einfluss auf die Produktion der Lagerstätte haben, wobei das erste Modell bestmöglich an eine endliche Zahl von Produktionswerten angepasst wird, die aus dem Abfluss-Simulator erhalten werden,
- c) Auswählen mindestens eines neuen Produktionswerts, der mit einem Punkt assoziiert ist, der in einem Bereich der Lagerstätte liegt, der in Abhängigkeit von der Nichtlinearität der Lagerstättenproduktion in diesem Bereich ausgewählt wird, wobei der neue Wert aus dem Abfluss-Simulator erhalten wird,
- d) Bestimmen eines zweiten Modells, indem das erste Modell so angepasst wird, dass die Antwort des zweiten Modells an dem Punkt dem neuen Produktionswert entspricht.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in Schritt c) die folgenden Schritte ausgeführt werden:

- Bestimmen eines Untermodells, das sich bestmöglich an die endliche Zahl der Produktionswerte anpasst, mit Ausnahme eines Testwerts, ausgewählt unter der endlichen Zahl der Produktionswerte,
- Berechnen eines Vorhersageresiduums, das mit dem Testwert assoziiert ist, indem die Differenz zwischen der Antwort des Untermodells und dem Testwert ausgeführt wird,
- Berechnen des Vorhersageresiduums, das mit jedem der Vorhersage-Werte assoziiert ist, indem die beiden vorherigen Schritte wiederholt werden, indem nacheinander dem Testwert jeder der Werte zugewiesen wird, die in der endlichen Zahl der Produktionswerte enthalten sind,
- Auswählen des neuen Produktionswerts in einem Bereich der Lagerstätte, nahe einem Punkt, der mit einem Produktionswert assoziiert ist, der das größte Vorhersageresiduum aufweist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei der neue Produktionswert ausgewählt wird, unter Berücksichtigung des Produktionsgradienten an einem Punkt, der mit dem Produktionswert assoziiert ist, der das größte Vorhersageresiduum hat.

## EP 1 630 348 B1

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 und 3, wobei in Schritt c) ein neuer Wert ausgewählt wird, und Schritt d) unter der Voraussetzung ausgeführt wird, dass das größte Vorhersageresiduum oberhalb eines zuvor festgelegten Werts liegt.
5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in Schritt c) die folgenden Schritte ausgeführt werden:
- Bestimmen einer ersten Kriging-Varianz des ersten Modells für die endliche Zahl der Produktionswerte, die aus dem Abfluss-Simulator erhalten werden,
  - Auswählen eines ersten Kontrollpunkts in der Lagerstätte an der Stelle, an der die erste Kriging-Varianz maximal ist,
  - Bestimmen einer zweiten Kriging-Varianz des ersten Modells für die endliche Zahl der Produktionswerte, die aus dem Abfluss-Simulator und dem ersten Kontrollpunkt erhalten werden,
  - Auswählen eines zweiten Kontrollpunkts in der Lagerstätte an der Stelle, an der die zweite Kriging-Varianz maximal ist,
  - Zuweisen eines Werts jedem der Kontrollpunkte, indem die fünf folgenden Operationen für jeden der Kontrollpunkte ausgeführt werden:
    - Bestimmen eines Untermodells, das sich bestmöglich an die endliche Zahl der Produktionswerte und an den Wert anpasst, der mit einem der Kontrollpunkte assoziiert ist, mit Ausnahme eines Testwerts, ausgewählt unter der endlichen Zahl der Produktionswerte und dem Wert, der mit dem Kontrollpunkt assoziiert ist,
    - Berechnen eines Vorhersageresiduums, das mit dem Testwert assoziiert ist, indem die Differenz zwischen der Antwort des Untermodells und dem Testwert ausgeführt wird,
    - Berechnen des Vorhersageresiduums, das mit jeder der Antworten des Untermodells assoziiert ist, indem die beiden vorherigen Operationen wiederholt werden, indem dem Testwert jeder der Werte nacheinander zugewiesen wird, der in der Gesamtheit, bestehend aus der endlichen Zahl der Produktionswerte und dem Wert, der mit dem Kontrollwert assoziiert ist, enthalten sind,
    - Berechnen der Summe der absoluten Werte der Vorhersageresiduen, die für jeden der Testwerte berechnet werden,
    - Zuweisen des Werts, der diese Summe minimiert, an den Kontrollwert,
  - Bestimmen eines zweiten Untermodells, das sich bestmöglich an die endliche Zahl der Produktionswerte und an die Werte der Kontrollpunkte anpasst,
  - für jeden der Kontrollpunkte wird die Differenz zwischen der Antwort des zweiten Untermodells und die Antwort des ersten Modells ausgeführt,
  - Assoziieren des neuen Produktionswert aus Schritt c) mit dem Kontrollpunkt, für den die Differenz am größten ist,
6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei in Schritt d) das zweite Modell bestimmt wird, indem das erste Modell so angepasst wird, dass die Antwort des zweiten Modells auf den ausgewählten Kontrollpunkt dem neuen Produktionswert entspricht, und außerdem den Werten, die den anderen Kontrollpunkten zugewiesen werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei in Schritt c) die folgenden Schritte ausgeführt werden:
- Bestimmen eines analytischen Modells, das den Differenzialquotienten der Produktion der Lagerstätte in Abhängigkeit von der Zeit ausdrückt, wobei das Modell bestmöglich an die Differenzialquotienten an den Punkten angepasst wird, die mit den Produktionswerten assoziiert sind, die in Schritt b) verwendet werden,
  - aus dem Modell, das den Differenzialquotienten ausdrückt, wird mindestens ein neuer Produktionswert ausgewählt, der mit einem Punkt assoziiert ist, an dem die Antwort des Modells, das den Differenzialquotienten ausdrückt, null ist.
8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei in Schritt c) ein neuer Wert ausgewählt wird und Schritt d) unter der Voraussetzung ausgeführt wird, dass das Vorhersageresiduum des neuen ausgewählten Werts oberhalb eines zuvor festgelegten Werts liegt.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 und 8, wobei nach Schritt d) die folgenden Schritte ausgeführt werden:
- Bestimmen eines dritten analytischen Modells, das den Differenzialquotienten der Produktion der Lagerstätte in Abhängigkeit von der Zeit ausdrückt, wobei das dritte Modell bestmöglich an die Differenzialquotienten an

## EP 1 630 348 B1

den Punkten angepasst wird, die mit der endlichen Zahl der Produktionswerte assoziiert sind, die in Schritt c) ausgewählt werden,

- wenn die Antwort des dritten analytischen Modells auf den in Schritt c) ausgewählten Punkt größer null ist, Bestimmen eines Punkts, der mit dem maximalen Wert der Antwort des zweiten Modells nahe dem in Schritt c) ausgewählten Werts assoziiert ist,

- wenn die Antwort des dritten analytischen Modells auf den in Schritt c) ausgewählten Punkt kleiner null ist, Bestimmen eines Punkts, der mit dem minimalen Wert der Antwort des zweiten Modells nahe dem in Schritt c) ausgewählten Werts assoziiert ist,

- Bestimmen eines neuen Produktionswerts durch den Abfluss-Simulator an dem Punkt, der mit dem zuvor bestimmten minimalen oder maximalen Wert assoziiert ist,

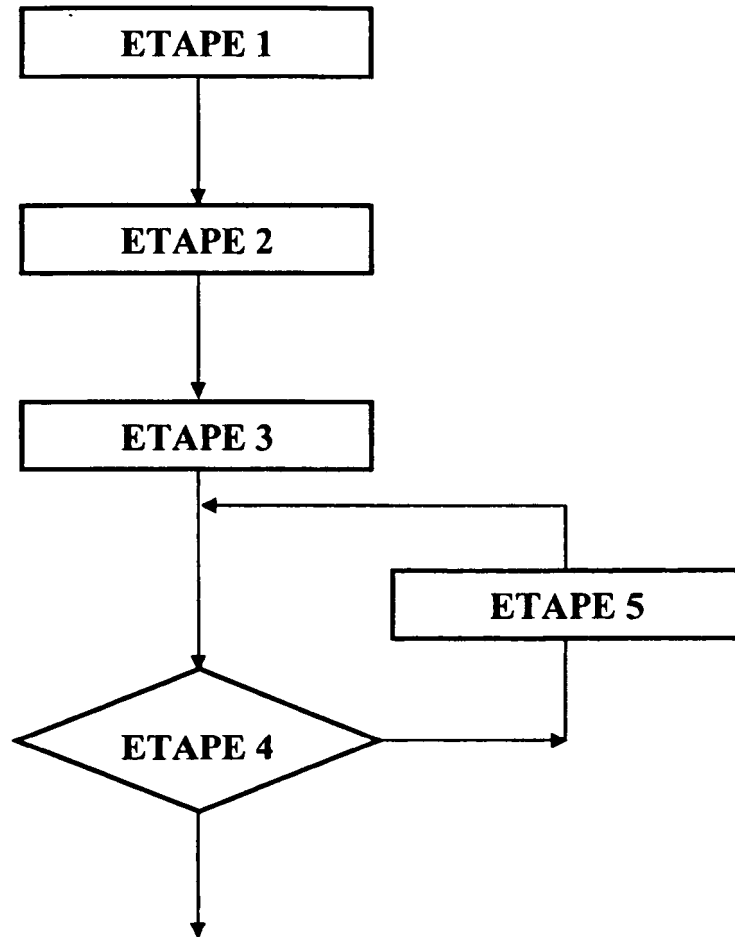
- Bestimmen eines vierten Modells, indem das zweite Modell so angepasst wird, dass die Antwort des vierten Modells dem neuen Wert entspricht, der in dem vorherigen Schritt bestimmt wurde.

**10.** Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Schritte c) und d) wiederholt werden.

**11.** Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in Schritt b) die Produktionswerte gewählt werden, indem ein Versuchsplan verwendet wird.

**12.** Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in Schritt b) das erste Modell unter Verwendung eines der folgenden Näherungsverfahren angepasst wird: polynomiale Näherung, neuronale Netze, Support-Vector-Maschinen.

**13.** Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in Schritt d) eines der folgenden Interpolationsverfahren verwendet wird. Kriging-Verfahren und Spline-Verfahren.



**FIG.1**

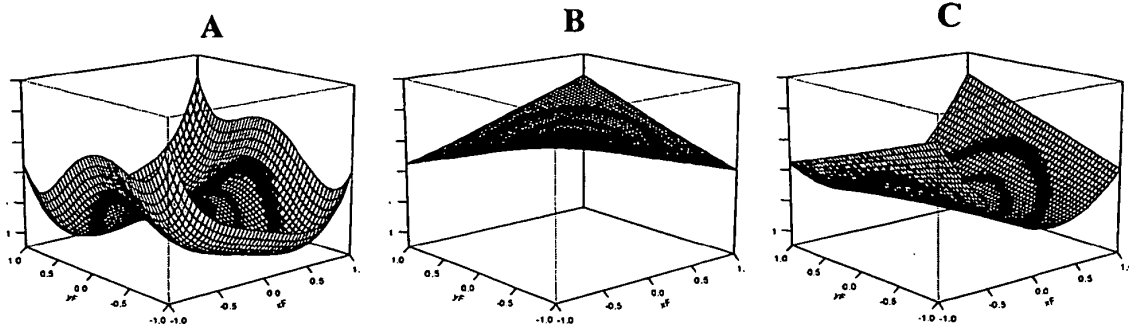


FIG.2

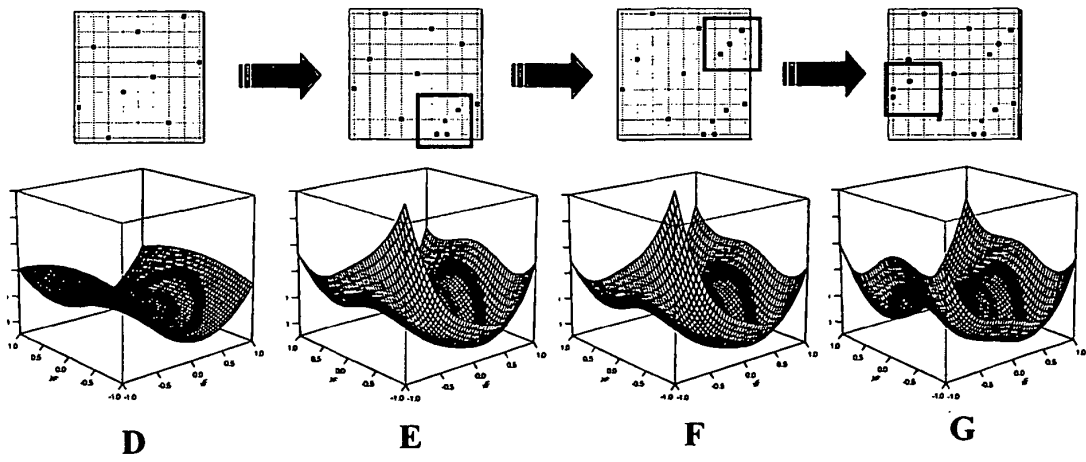


FIG.3

## RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

*Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.*

### Documents brevets cités dans la description

- FR 2855631 [0007]
- FR 2855633 [0007]
- US 6108608 A [0007]

### Littérature non-brevet citée dans la description

- **DEJEAN, J.P. ; BLANC, G.** Managing uncertainties on production predictions using integrated statistical methods. *SPE 56696, SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 03 Octobre 1999 [0033]
- **BOX, G.E.P. ; HUNTER, J.S.** The 2k-p fractional factorial designs. *Part I, Technometrics*, 1961, vol. 2, 311-352 [0033]
- **BOX, G.E.P. ; HUNTER, J.S.** The 2k-p fractional factorial designs. *Part II, Technometrics*, 1961, vol. 3, 449-458 [0033]
- **BOX, G.E.P ; WILSON, K.B.** On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, vol. 13, 1-45 [0033]
- **DRAPER, N. R.** Small composite designs. *Technometrics*, 1985, vol. 27, 173-180 [0033]
- **ATKINSON, A.C. ; DONEV, A.N.** Optimum experimental designs. Oxford University press, 1992 [0033]
- **CRESSIE, N.** Statistics for spatial Data. Wiley, 1991 [0038] [0049]