

(19)



(11)

EP 2 859 183 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
25.04.2018 Bulletin 2018/17

(51) Int Cl.:
E21B 43/26^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **13726784.5**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/EP2013/061407

(22) Date de dépôt: **03.06.2013**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2013/178826 (05.12.2013 Gazette 2013/49)

(54) **FRACTURATION ELECTRIQUE AMELIOREE D'UN RESERVOIR**

VERBESSERTES ELEKTRISCHES AUFBRECHEN EINER LAGERSTÄTTE

IMPROVED ELECTRIC FRACTURING OF A RESERVOIR

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

- **MARTIN, Justin**
31170 Tournefeuille (FR)
- **REESS, Thierry**
F-64140 Billère (FR)
- **SYLVESTRE de FERRON, Antoine**
F-64160 Bernadets (FR)

(30) Priorité: **01.06.2012 FR 1255132**

(43) Date de publication de la demande:
15.04.2015 Bulletin 2015/16

(74) Mandataire: **Hirsch & Associés**
137, rue de l'Université
75007 Paris (FR)

(73) Titulaire: **Total SA**
92400 Courbevoie (FR)

(56) Documents cités:
WO-A2-2009/073475 US-A1- 2001 011 590

(72) Inventeurs:
• **REY-BETHBEDER, Franck**
F-64170 Lacq (FR)

EP 2 859 183 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

[0001] La présente invention concerne un dispositif et un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures, ainsi qu'un procédé de production d'hydrocarbures et un procédé de calibrage du dispositif.

[0002] Dans la production d'hydrocarbures, la perméabilité et/ou la porosité du matériau constituant le réservoir a une influence sur la production d'hydrocarbures, notamment sur la vitesse de production et ainsi la rentabilité. C'est notamment ce que rappelle l'article "Porosity and permeability of Eastern Devonian Shale gas" de Soeder, D.J., publié dans SPE Formation Evaluation, en 1988, vol. 3, n°1, pp. 116-124, qui présente l'étude de huit échantillons de « shale gas » (i.e. gas de schiste) du Dévonien, issus des Appalaches. Cet article explique notamment que la production de ce shale gas présente la difficulté que la perméabilité du réservoir (i.e. du matériau constituant le réservoir) est faible.

[0003] Ainsi, diverses techniques existent pour faciliter la vitesse de production d'hydrocarbures, notamment dans un réservoir peu perméable et peu poreux. Ces techniques consistent à fracturer le réservoir de manière statique ou dynamique.

[0004] La fracturation statique est une dislocation ciblée du réservoir, par le moyen de l'injection sous très haute pression d'un fluide destiné à fissurer la roche. La fissure est effectuée par un « stress » mécanique issu d'une pression hydraulique obtenue à l'aide d'un fluide injecté sous haute-pression à partir d'un puits foré depuis la surface. On parle aussi d'« hydrofracturation » ou « fracturation hydrosiliceuse » (ou encore « frac jobs », « frac'ing » ou plus généralement « fracking », ou de « fracturation hydraulique massive »). Le document US 2009/044945 A1 présente notamment un procédé de fracturation statique tel que décrit ci-dessus.

[0005] La fracturation statique présente l'inconvénient que la fracturation du réservoir est généralement unidirectionnelle. Ainsi, seul l'hydrocarbure présent dans la portion du réservoir autour d'une fissure profonde mais très localisée est produit plus rapidement.

[0006] Pour obtenir une fracturation plus diffuse, la fracturation dynamique, ou fracturation électrique, a été introduite. La fracturation électrique consiste à générer un arc électrique dans un puits foré dans le réservoir (typiquement le puits de production). L'arc électrique induit une onde de pression qui endommage le réservoir dans toutes les directions autour de l'onde et accroît ainsi sa perméabilité.

[0007] Plusieurs documents traitent de la fracturation électrique. Par exemple, le document US 4,074,758 présente un procédé consistant à générer une onde de choc électro-hydraulique dans un liquide dans le puits de forage pour mieux récupérer du pétrole. Le document US 4,164,978 suggère de faire suivre l'onde de choc par une onde ultrasonique. Le document US 5,106,164 décrit également un procédé pour générer une explosion plasmique et ainsi fracturer une roche, mais dans le cas d'un trou peu profond, pour une application minière et non de production d'hydrocarbures. Les documents US 4,651,311 et US 4,706,228 présentent un dispositif pour générer une décharge électrique avec des électrodes dans une chambre contenant un électrolyte, dans lequel les électrodes ne sont pas sujettes à l'érosion par le plasma de la décharge. Le document WO 2009/073475 décrit un procédé pour générer une onde acoustique dans un milieu fluide présent dans un puits avec un dispositif comprenant deux électrodes entre une garniture d'étanchéité supérieure et une garniture d'étanchéité inférieure définissant un espace confiné. Ce document décrit que l'onde acoustique est maintenue dans un état non-« onde de choc » afin d'améliorer l'endommagement, sans toutefois expliciter les différences entre onde acoustique « ordinaire » et onde de « choc ».

[0008] Aucun de ces documents ne produit une fracturation du réservoir entièrement satisfaisante. Il y a donc un besoin pour fracturer un réservoir d'hydrocarbures de manière améliorée.

[0009] Pour cela, il est proposé un dispositif de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures, dans lequel le dispositif comprend deux garnitures d'étanchéité définissant entre elles un espace confiné dans un puits foré dans le réservoir, un appareil de régulation de la température d'un fluide dans l'espace confiné, une paire de deux électrodes agencées dans l'espace confiné, et un circuit électrique pour la génération d'un arc électrique entre les deux électrodes. Le circuit comprend au moins une source de tension reliée aux électrodes et une bobine d'inductance entre la source de tension et l'une des deux électrodes.

[0010] Suivant des exemples, le dispositif peut comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- l'appareil de régulation de la température régule la température du fluide pour optimiser le rendement énergétique de la phase de pré-décharge lors de la génération d'un arc électrique ;
- l'appareil de régulation de la température maintient la température du fluide à une valeur comprise entre 45 et 67°C, de préférence supérieure à 50°C et/ou inférieure à 62°C ;
- le dispositif comprend en outre un appareil de régulation de la pression du fluide sensiblement à la pression atmosphérique ;
- l'appareil de régulation de la température comprend un système de refroidissement de fluide ;
- la bobine d'inductance est d'inductance réglable, de préférence comprise entre 1 μ H et 100 mH, encore de préférence comprise entre 10 μ H et 1 mH ;
- la distance entre les deux électrodes est réglable, de préférence comprise entre 0,2 et 5 cm, encore de préférence

comprise entre 1 et 3 cm ;

- la source de tension comprend un condensateur de capacité supérieure à 1 μF , de préférence supérieure à 10 μF ;
- la capacité du condensateur est réglable, de préférence inférieure à 1000 μF , encore de préférence inférieure à 200 μF ;
- le circuit comprend en outre un générateur de Marx et des ferrites formant une inductance saturable dans un chemin menant le condensateur directement à l'inductance, les ferrites étant saturées une fois le générateur de Marx déchargé ;
- le condensateur est séparé de l'inductance par un éclateur amorçable par un générateur d'impulsions ;
- les électrodes ont un rayon compris entre 0,1 mm et 50 mm, de préférence entre 1 mm et 30 mm ;
- le dispositif comprend un système de décrochage ; et/ou
- le dispositif comprend plusieurs paires d'électrodes.

[0011] Il est également proposé un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures. Le procédé comprend la fracturation électrique du réservoir par la génération d'un arc électrique par le ci-dessus et, simultanément, la régulation de la température d'un fluide dans l'espace confiné du dispositif.

[0012] Il est également proposé un procédé de production d'hydrocarbures, comprenant la fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures selon le procédé ci-dessus.

[0013] Il est également proposé un procédé de calibrage de l'appareil de régulation de la température du dispositif ci-dessus. Le procédé de calibrage comprend les étapes consistant à fournir le dispositif, déterminer une tension de pré-claquage au-delà de laquelle l'arc électrique est généré, puis mesurer une tension de claquage aux bornes des électrodes et un temps de claquage en fonction de la température du fluide, en appliquant la tension de pré-claquage et en faisant varier la température du fluide, puis déduire de l'étape précédente le rendement énergétique de la phase de pré-décharge en fonction de la température, puis définir une température ou un intervalle de températures cible pour l'appareil de régulation de la température en fonction d'un maximum du rendement énergétique déduit à l'étape précédente.

[0014] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui suit des modes de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemple uniquement et en références aux dessins qui montrent :

- figures 1 à 4, des exemples du dispositif ;
- figures 5 à 17, des exemples de mesures ;
- figures 18 à 20, des schémas représentant des procédés de fracturation proposés ; et
- figures 21 à 23, un exemple de la fracturation électrique du procédé de fracturation de l'une quelconque des figures 18 à 20.

[0015] Il est proposé un dispositif de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures. Le dispositif comprend deux garnitures d'étanchéité définissant entre elles un espace confiné dans un puits foré dans le réservoir (i.e. prévu pour être confiné au moins lorsque le dispositif est installé dans un puits foré dans le réservoir). Le dispositif comprend un appareil de régulation de la température d'un fluide dans l'espace confiné. Le dispositif comprend une paire de deux électrodes agencées dans l'espace confiné. Et le dispositif comprend également un circuit électrique (configuré/adapté/prévu) pour la génération d'un arc électrique entre les deux électrodes. Le circuit comprend au moins une source de tension reliée aux électrodes et une bobine d'inductance entre la source de tension et l'une des deux électrodes.

[0016] Un tel dispositif permet de fracturer un réservoir d'hydrocarbures de manière améliorée. Notamment, un tel dispositif permet de générer un arc électrique entre les deux électrodes, et ainsi de procéder à une fracturation électrique du réservoir lorsque le dispositif est situé dans un puits foré dans le réservoir. La bobine d'inductance permet d'obtenir un arc électrique donnant naissance à une onde de pression qui fracture le réservoir de manière améliorée. L'appareil de régulation de la température permet de réguler la température, et ainsi d'avoir la température permettant d'obtenir une onde de pression entraînant une bonne fracturation du réservoir.

[0017] L'expression « arc électrique » désigne un courant électrique créé dans un milieu isolant. La génération de l'arc électrique induit une « onde de pression », i.e. une onde mécanique faisant subir en son passage une pression au milieu dans lequel l'onde passe. La génération de l'arc électrique permet un endommagement du réservoir plus diffus/multidirectionnel que l'endommagement issu d'une fracturation statique. La génération de l'arc électrique entraîne ainsi des micro fissures dans toutes les directions autour de la position de l'arc électrique, et augmente ainsi la perméabilité du réservoir, typiquement d'un facteur 10 à 1000. De plus, cette augmentation de la perméabilité intervient sans pour autant utiliser un moyen pour empêcher la fermeture des microfissures, tel l'injection de propant. En outre, la fracturation électrique ne nécessite pas d'énergies considérables ni de quantités d'eau trop importantes. Il n'y a donc pas besoin de système de recyclage de l'eau particulier.

[0018] On peut ainsi accéder à de l'hydrocarbure présent dans le réservoir difficilement disponible par fracturation statique. La combinaison de la fracturation statique et de la fracturation électrique permet donc une meilleure fracturation

globale du réservoir.

[0019] L'arc électrique est de préférence généré dans un fluide présent dans un puits foré dans le réservoir. L'onde de pression issue de l'arc électrique est ainsi transmise avec moins d'atténuations. Le puits foré contient du fluide qui est typiquement de l'eau. En d'autres termes, lorsque la fracturation électrique succède à un procédé de forage, le puits foré peut être automatiquement rempli d'eau présente dans le réservoir. Potentiellement, si le puits foré ne se remplit pas automatiquement, on peut le remplir artificiellement.

[0020] Le dispositif va être décrit avant de décrire un tel procédé de fracturation électrique. Il sera toutefois fait référence au procédé lors de la description du dispositif, et il est bien entendu que les différentes fonctionnalités du dispositif (i.e. les différentes actions qu'il permet d'accomplir) peuvent être intégrées au procédé même lorsqu'elles ne sont pas reprises dans la description du procédé.

[0021] Le circuit comprend au moins une bobine d'inductance entre la source de tension et l'électrode à laquelle elle est reliée. La bobine d'inductance est un composant qui induit un retard temporel du courant par rapport à la tension. La valeur d'une inductance s'exprime en Henry. La bobine d'inductance peut éventuellement être enroulée autour d'un noyau en matériau ferromagnétique, ou des ferrites. La bobine d'inductance est également connue sous les noms de « self », « solénoïde », ou encore « auto-inductance ». L'inductance atténue le front de courant dans le circuit. Cela permet d'obtenir un temps de montée de l'onde de pression plus lent, et donc une onde de pression qui pénètre mieux dans le réservoir. L'endommagement du réservoir est ainsi plus profond. Notamment, l'inductance peut être supérieure à 1 μH ou à 10 μH , et/ou inférieure à 100 mH ou à 1 mH.

[0022] Les garnitures d'étanchéité peuvent être prévues pour se conformer à la paroi du puits, généralement cylindrique, définissant ainsi entre elles un espace confiné. Alternativement, ou en outre, le dispositif peut comprendre une membrane qui délimite l'espace confiné. La membrane peut être hermétique (ou étanche) et rigide. Cela permet de dissocier la pression régnant dans l'espace confiné de la pression environnante, par exemple de la pression hydrostatique du puits si celui-ci est inondé (e.g. suite à une fracturation hydraulique). La membrane est alors préférentiellement en un matériau adapté à une bonne conduction des ondes de pression, ce qui optimise la fracturation électrique. Ainsi, le fluide peut être un fluide (e.g. de l'eau) présent dans le puits foré, ou bien déjà compris dans le dispositif, même avant son utilisation. Dans ce dernier cas, le fluide peut être de l'eau déminéralisée (e.g. de conductivité $\sigma = 40 \mu\text{S}/\text{cm}$). Cela permet d'augmenter la valeur de la résistance équivalente de l'enceinte et donc de limiter les énergies de claquage. Le dispositif peut prévoir une ouverture pour renouveler l'eau.

[0023] Par « confiné », on entend que l'espace confiné est prévu pour que la température y régnant puisse être modifiée grâce à l'appareil de régulation de la température, et optionnellement pour que la pression y régnant puisse également être modifiée grâce à un éventuel appareil de régulation de la pression du fluide dans l'espace confiné (e.g. l'appareil de régulation de la pression comprend une pompe, e.g. une pompe d'augmentation de la pression du fluide). Cette (ces) régulation(s) permettent d'optimiser le fluide présent dans l'espace confiné pour favoriser l'apparition d'un arc électrique entre les deux électrodes et/ou pour que l'arc électrique obtenu donne naissance à une bonne onde de pression, en fonction des conditions du réservoir ou de la nature du fluide. Ainsi, le « confinement » peut mais ne signifie pas nécessairement une fermeture totale, et de même, l'étanchéité peut mais n'est pas nécessairement totale.

[0024] L'appareil de régulation de la température est un appareil qui maintient (au moins approximativement) la température du fluide égale à une valeur cible ou comprise dans un intervalle cible. Ainsi, l'appareil de régulation de la température peut comprendre un thermostat. La cible peut être prédéterminée ou calculée, éventuellement en fonction de valeurs d'entrée, par exemple des valeurs issues de mesures, e.g. de la pression du fluide. Notamment, la cible peut être adaptée aux conditions du réservoir et/ou du fluide dans l'espace confiné et/ou des caractéristiques du dispositif de fracturation et/ou du fluide, de manière à avoir la « meilleure » température ou le « meilleur » intervalle de températures en fonction de ces conditions et/ou caractéristiques. L'appareil de régulation de la température peut donc comprendre un capteur de température et/ou une unité de contrôle avec un processeur couplé à une mémoire enregistrant la cible ou un programme permettant de calculer la cible. De manière additionnelle, l'appareil de régulation de la température peut comprendre un système de chauffage du fluide et/ou un système de refroidissement du fluide pour effectuer la régulation. Ces différents composants sont connus de l'homme de l'art.

[0025] Par « meilleure » température ou « meilleur » intervalle de température, on entend la ou les température(s) qui, étant donné les caractéristiques du dispositif et du fluide, et la pression du fluide, permet(tent) d'obtenir une onde de pression (suite à la génération de l'arc électrique) entraînant un endommagement plus profond et/ou plus diffus. En effet, suite à des tests, notamment ceux qui seront présentés par la suite, il s'est avéré de manière surprenante qu'un tel optimum de température existait, alors qu'on pouvait penser que plus le fluide s'approchait de sa température d'ébullition, en restant toutefois en-deçà, meilleur serait l'endommagement. L'appareil de régulation de la température permet ainsi de réguler la température par exemple autour d'une cible bien en-deçà de la température d'ébullition du fluide, et d'obtenir de manière surprenante un meilleur endommagement.

[0026] Notamment, l'appareil de régulation de la température peut (être prévu pour) réguler la température du fluide pour optimiser le rendement énergétique de la phase de pré-décharge lors de la génération d'un arc électrique. Le rendement énergétique de la phase de pré-décharge est le ratio (ou une mesure proportionnelle à ce ratio) entre l'énergie

électrique nécessaire pour initier l'onde de pression induite par l'arc électrique et l'énergie électrique fournie par le dispositif expérimental (laquelle énergie électrique est déterminée par le dimensionnement du dispositif). Plus le rendement énergétique de la phase de pré-décharge est élevé, plus il « reste », après la phase de pré-décharge, de l'énergie disponible pour la phase de décharge elle-même, ce qui se traduit en une onde de pression plus performante. En d'autres termes, la cible est choisie pour optimiser (au moins approximativement) cette mesure.

[0027] Par exemple, cela peut être réalisé par un procédé de calibrage (i.e. une configuration préalable à l'utilisation) de l'appareil de régulation de la température du dispositif. On peut tout d'abord fournir le dispositif, e.g. en conditions réelles dans le puits, ou en reproduisant en laboratoire la pression du fluide pour laquelle il est envisagé d'utiliser le dispositif (en d'autres termes, le fluide est également fourni). On peut en outre déterminer une tension de pré-claquage du dispositif (i.e. le seuil de tension appliquée entre les électrodes au-delà duquel l'arc électrique est généré). Cela peut se faire de différentes manières, l'une d'entre elle étant expliquée par la suite lors de la présentation des tests, notamment en référence aux figures 11 à 17. Ensuite, on peut mesurer la tension de claquage aux bornes des électrodes (i.e. la tension aux bornes des électrodes nécessaire à l'initiation de l'arc électrique) et le temps de claquage (i.e. la durée d'application de la tension nécessaire à l'initiation de l'arc électrique) en fonction de la température du fluide (i.e. on fait varier la température pour effectuer les différentes mesures). Pour cela, on applique la tension de pré-claquage (déterminée auparavant) et on fait varier la température du fluide. On peut alors déduire de l'étape précédente le rendement énergétique de la phase de pré-décharge en fonction de la température (une manière de réaliser cette étape sera discutée par la suite, notamment en référence aux figures 11 à 17). Enfin, on peut définir une température ou un intervalle de températures cible pour l'appareil de régulation de la température en fonction (i.e. en accord avec) d'un maximum du rendement énergétique déduit à l'étape précédente.

[0028] Dans un exemple, l'appareil de régulation de la température peut maintenir la température du fluide à une valeur comprise entre 45 et 67°C, de préférence supérieure à 50°C et/ou inférieure à 62°C. Ces valeurs de température du fluide dans l'espace confiné permettent d'obtenir un rendement énergétique de la phase de pré-décharge supérieur à 80% à pression atmosphérique. Ainsi, le dispositif comprend de manière appropriée un appareil de régulation de la pression du fluide adapté à réguler la pression du fluide sensiblement à la pression atmosphérique.

[0029] Comme mentionné précédemment, l'appareil de régulation de la température peut comprendre un système de refroidissement de fluide. Cela permet une meilleure utilisation du dispositif, notamment de rester à l'optimum de température. En effet, chaque arc électrique généré élevant la température au-delà de la cible par dégagement de chaleur, il convient de refroidir l'eau à partir de la génération d'un certain nombre de générations d'un tel arc électrique pour rester à l'optimum de température.

[0030] Le dispositif peut être mobile le long du puits et se fixer avant la génération d'un arc électrique. Par exemple, le dispositif peut comprendre des moyens de déplacement, e.g. par téléguidage. Le dispositif peut alors être alimenté par une alimentation haute tension localisée à la surface et reliée au dispositif par des câbles électriques suivant le puits. Le dispositif peut alors également comprendre un système de décrochage. Cela permet de laisser le dispositif dans le puits lorsque celui-ci est bloqué. On peut alors récupérer le puits et/ou le train de tige.

[0031] Le dispositif peut être de forme générale allongée, ce qui permet de le déplacer plus facilement dans le puits. Le dispositif peut également comprendre plusieurs paires d'électrodes, sur une longueur. Les électrodes peuvent être alimentées par plusieurs capacités de stockage. Cela permet de réaliser la fracturation plus rapidement. En effet, plusieurs arcs électriques peuvent alors être générés en même temps entre chaque paire d'électrodes, et réaliser plusieurs endommagements en même temps.

[0032] Le dispositif peut comprendre un système d'injection d'additif chimique qui inclut un bac de stockage pour le stockage de l'additif et une pompe, pour injecter l'additif dans le volume confiné, lors de l'usage du dispositif. L'appareil de chauffage peut comprendre une source de fluide chaud et un conduit d'acheminement, le conduit ayant une ouverture à proximité des électrodes de façon que, lors du fonctionnement du dispositif, du fluide chaud peut être acheminé depuis la source vers les électrodes. Le conduit d'acheminement peut traverser une ou les deux électrodes. Ces différentes caractéristiques permettent d'optimiser les conditions pour favoriser l'apparition d'un arc électrique.

[0033] D'autres caractéristiques potentielles du dispositif de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures vont maintenant être présentées en référence aux figures 1 à 4 qui montrent un dispositif 100 constituant un exemple du dispositif de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures présenté ci-dessus.

[0034] Le dispositif 100 de la figure 1 comprend les deux garnitures d'étanchéité 102 et 103 définissant entre elles l'espace confiné 104. L'espace confiné 104 est ici délimité en outre par la membrane 108. Le dispositif 100 comprend également les deux électrodes 106 agencées dans l'espace confiné 104. Les deux électrodes 106 sont dans l'exemple reliées respectivement à la source de tension par une entrée 109 et à une masse 103 (ici confondue avec la garniture d'étanchéité 103) du circuit, ce qui permet la formation de l'arc électrique entre les deux électrodes 106. Les électrodes peuvent avoir un rayon compris entre 0,1 mm et 50 mm, de préférence entre 1 mm et 30 mm. L'entrée 109 peut consister en un câble isolé.

[0035] Sur la figure 1, sont également représentées de manière schématique l'appareil de régulation de la température 105 du fluide dans l'espace confiné et l'appareil de régulation de la pression 107. Le circuit électrique pour la génération

d'un arc électrique entre les deux électrodes 106, sa source de tension et l'inductance ne sont pas représentées, mais peuvent être conformes aux figures 2 à 4 qui présentent de manière schématique des exemples du dispositif 100.

[0036] Le dispositif 100 de la figure 2 comprend la bobine d'inductance 110. La source de tension comprend le condensateur 112. Comme on le voit sur le schéma de la figure 2, lorsque le condensateur 112 se décharge, un arc électrique peut apparaître entre les électrodes 106. Le condensateur 112 peut présenter une capacité supérieure à 1 μF , de préférence supérieure à 10 μF . Une telle capacité permet d'atteindre une énergie entraînant l'apparition d'un arc subsonique.

[0037] La décharge électrique est dite « subsonique » ou « supersonique » suivant sa vitesse de formation. Une décharge « subsonique » est typiquement associée à des processus thermiques : l'arc se propage à travers des bulles de gaz créées par l'échauffement de l'eau. On parle de propagation « lente » de la décharge électrique, typiquement de l'ordre de 10 m/s. Les caractéristiques principales d'une décharge subsonique sont liées à de fortes énergies mises en jeu (typiquement au-delà de plusieurs centaines de Joules), à des processus thermiques associés à un temps d'application long de la tension et à de faibles niveaux de tension (champ électrique faible). Dans ce régime de décharge, l'onde de pression se propage dans un volume de gaz important avant de se propager dans le fluide. Une décharge « supersonique » est typiquement associée à des processus électroniques. La décharge se propage dans l'eau sans processus thermique avec un aspect filamentaire. On parle de propagation « rapide » de la décharge électrique, de l'ordre de 10 km/s. Les caractéristiques d'une décharge supersonique sont liées à de faibles énergies mises en jeu, à des tensions importantes associées avec un temps d'application court et à de forts champs électriques (MV/cm). Pour ce régime de décharge, les effets thermiques sont négligeables. La décharge ne pouvant pas se développer directement dans la phase liquide, la notion de micro-bulles peut être prise en compte pour expliquer le développement de ce régime de décharge. Le volume de gaz mis en jeu est plus faible que dans le cas de décharges subsoniques.

[0038] Le condensateur 112 peut présenter une capacité inférieure à 1000 μF , de préférence inférieure à 200 μF .

[0039] Le condensateur 112 est séparé de l'inductance par l'éclateur 114 amorçable par le générateur d'impulsions 116. Cela permet de contrôler les décharges du condensateur 112 et ainsi les ondes de pression générées par l'arc électrique. Notamment, le générateur d'impulsions 116 peut être configuré pour une répétition des ondes, comme décrit par la suite.

[0040] La source de tension (i.e. le condensateur 112) est chargée par un chargeur Haute Tension 120 prévu dans un circuit auxiliaire 122 à une tension U comprise entre 1 et 500 kV, de préférence entre 50 et 200 kV. Le circuit auxiliaire est de préférence situé à la surface, et est alors séparable du dispositif.

[0041] Le dispositif 100 de la figure 3 est différent de l'exemple de la figure 2 en ce qu'un générateur de Marx 118 remplace le condensateur 112 et l'ensemble (éclateur 114 + générateur d'impulsion 116). Le générateur de Marx 118 permet lors de sa décharge la création d'un arc électronique supersonique, en imposant une tension plus élevée que le condensateur 112.

[0042] Dans le dispositif 100 de la figure 4, la source de tension comprend le condensateur 112 de la figure 2 et le générateur de Marx 118 de la figure 3. Toutefois, le générateur d'impulsions 116 amorce le premier éclateur 117 du générateur de Marx 118. Le dispositif 100 comprend en outre les ferrites 119 formant une inductance saturable dans un chemin menant le condensateur directement à l'inductance. Les ferrites 119 sont configurées pour être saturées une fois le générateur de Marx 118 déchargé. Une fois les ferrites 119 saturées, seul le condensateur 112 se décharge. Cela permet une isolation temporaire du condensateur 112 et donc le passage (i.e. la commutation) d'un arc supersonique à un arc subsonique. Le dispositif assure donc un couplage entre une décharge supersonique et subsonique. Une telle combinaison des deux modes supersonique et subsonique permet un meilleur rendement électro-acoustique, et donc un meilleur endommagement à moindre effort électrique. La décharge subsonique produite par le condensateur 112 intervient quant à elle après un retard correspondant au temps de claquage du générateur de Marx 118. La commutation peut se faire en un temps inférieur à 1 s. Typiquement, la durée de la décharge produite par le générateur de Marx 118 est très courte, de durée inférieure à 1 microseconde, et d'amplitude supérieure à 100 kV.

[0043] Dans les trois exemples des figures 2 à 4, et comme indiqué par les figures, les différents composants du dispositif 100 sont à caractéristiques réglables, i.e. on peut modifier leurs caractéristiques avant utilisation en fonction du réservoir, ou pendant l'utilisation en fonction de la réponse ou de l'avancement de la fracturation. Ainsi la bobine 110 peut être d'inductance réglable. Les caractéristiques du générateur de Marx 118 (capacité de chaque condensateur en parallèle, nombre de condensateurs fonctionnant) peuvent être réglables. La distance entre les électrodes 106, de préférence comprise entre 0,2 et 5 cm, encore de préférence comprise entre 1 et 3 cm, peut également être réglable. La capacité du condensateur 112 peut également être réglable. Cela permet d'avoir un dispositif 100 adapté à la fracturation de n'importe quel type de réservoir. En effet, il n'est pas nécessaire de remplacer le dispositif 100 lorsque l'on change de réservoir à fracturer (et que le matériau est différent) car il suffit de modifier un ou plusieurs des paramètres réglables. Cela permet également d'optimiser l'endommagement en modifiant, éventuellement à distance, les paramètres en cours d'utilisation.

[0044] Les explications fournies ci-dessus vont maintenant être illustrées par des développements théoriques et des essais décrits en référence aux figures 5 à 17 et relatifs notamment au dispositif 100 des figures 1 à 4.

[0045] Tout d'abord, l'amélioration de l'endommagement grâce à la présence de la bobine d'inductance est discutée en référence aux figures 5 à 10.

[0046] En référence à la figure 5 qui présente l'amplitude normalisée de la tension aux bornes du condensateur 112, la génération de l'onde de pression peut se décomposer en deux phases : une phase de pré-décharge S100 et une phase de post-décharge S110, séparées par l'apparition S105 de l'arc.

[0047] Durant la phase de pré-décharge S100, la tension chute. Cette chute correspond à la décharge de la capacité équivalente du banc d'énergie ou du générateur de Marx dans la résistance équivalente du dispositif 100. Plus la résistance équivalente est importante, meilleure est la conservation de l'énergie dans la phase de pré-claquage. La configuration d'électrodes peut donc, dans chaque cas (subsonique ou supersonique) permettre d'obtenir le moins de perte d'énergie possible. Cela correspond à l'optimisation du chauffage de l'eau dans un cas et du champ électrique dans l'autre.

[0048] Durant la phase de décharge S110, le circuit électrique peut être modélisé par un circuit RLC en régime oscillant.

[0049] L'équation de l'évolution du courant dans un circuit RLC série est présentée ci-dessous :

$$i(t) = \frac{U_B}{L\omega} \exp\left(-\frac{Rt}{2L}\right) \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\text{Avec } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (2)$$

[0050] Avec U_B qui est la tension au moment de la rupture diélectrique de l'eau. Les paramètres L , C et R sont respectivement l'inductance, la capacité et la résistance du circuit.

[0051] Ce courant $i(t)$ est fonction de la tension de claquage U_B (rupture diélectrique du milieu) du condensateur, de l'inductance et de la résistance du circuit.

[0052] Des expérimentations ont permis de mettre en évidence la linéarité de la pression de crête générée en fonction du courant maximal au moment de la rupture diélectrique de l'eau dans les deux modes de claquage. Un exemple de résultats est représenté sur les figures 6 et 7, qui représentent les mesures obtenues de pression de crête en fonction du courant maximal pendant la phase de décharge S110 et la régression linéaire des mesures, respectivement en mode subsonique et supersonique. On constate que la pression, à courant de crête similaire, est supérieure pour une décharge de type « supersonique ». Ceci peut être expliqué en partie par les processus engendrant l'arc électrique dans l'eau et le volume de gaz entre l'arc électrique et le liquide dans l'espace inter-électrodes présent.

[0053] Des expérimentations complémentaires ont mis en évidence l'influence de la distance inter-électrodes sur la valeur crête de l'onde de pression générée dans les deux modes de rupture diélectrique. La longueur de l'arc électrique est apparue avoir une influence directe sur la pression. Plus la distance inter-électrodes est grande, plus la valeur crête de la pression semble importante, comme présenté dans le graphique de la figure 8.

[0054] Des expérimentations ont porté sur l'influence de la géométrie des électrodes vis-à-vis de l'onde de pression. Les résultats sont présentés sur la figure 9. Elles ont permis de conclure que la forme des électrodes utilisées pour la génération de l'onde de pression ne semble pas avoir d'influence sur la valeur crête de la pression. Elle peut par contre minimiser les pertes électriques avant l'apparition de l'arc électrique.

[0055] Un capteur de pression a par ailleurs été utilisé pour visualiser les formes d'onde des pressions générées en fonction du spectre fréquentiel. Ce spectre fréquentiel peut en effet être modifié par le mode de rupture diélectrique, par les paramètres du circuit électrique, par le volume de gaz, ainsi que par la nature du liquide utilisé. Deux exemples de spectre fréquentiel associé à une décharge en mode subsonique et supersonique ont été testés. Il est apparu que plus le spectre présente des basses fréquences, moins l'endommagement était diffus.

[0056] Le résultat de diverses expérimentations faites met en évidence une relation linéaire du dP_{max}/dt_p en fonction du front de courant di_{max}/dt_i , représentée sur la figure 10. Le front de courant a une influence sur le front de pression. Plus le front de courant est lent plus la pression est basse fréquence.

[0057] Les études réalisées ont en outre clairement démontré un effet d'accumulation de l'endommagement en fonction du nombre de chocs. La notion de récurrence des impulsions semble donc un critère influant l'endommagement.

[0058] La mise en équation des principes évoqués ci-dessus est maintenant discutée.

[0059] Calcul du courant de crête noté i_{max} :

Pour calculer le courant i_{max} , on pose les conditions suivantes :

si

$$\sin(\omega t) = 1 \text{ et } \omega t = \frac{\pi}{2}$$

5 alors

$$i(t) = i_{\max} \text{ avec } t = \frac{\pi}{2\omega}$$

10

[0060] En utilisant les équations (1) et (2) :

$$15 \quad i_{\max} = \frac{U_b}{L\omega} \exp^{-\frac{R\pi}{4L\omega}} \quad (3)$$

$$20 \quad T_{\text{front}} = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{1}{LC}\left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \quad (4)$$

[0061] Dans le cas où on approxime la valeur de ω (valeur de R très faible) :

$$25 \quad \omega = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{1}{LC}\left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

$$30 \quad i_{\max} = U_b \sqrt{\frac{C}{L}} \exp^{-\frac{R\pi}{4}\sqrt{\frac{C}{L}}} \quad (6)$$

$$35 \quad T_{\text{front}} \approx \frac{\pi\sqrt{LC}}{2} \quad (7)$$

[0062] Relation de l'énergie

40

$$E_b = \frac{1}{2} C U_b^2 \text{ d'où } U_b = \sqrt{\frac{2E}{C}} \quad (8)$$

45 **[0063]** Avec E_b l'énergie et U_b la tension au moment de l'arc électrique. En remplaçant l'équation (8) dans (3) :

$$50 \quad i_{\max} = \sqrt{\frac{2E_b}{L}} \exp^{-\frac{R\pi}{4}\sqrt{\frac{C}{L}}} \quad (9)$$

[0064] Le courant crête i_{\max} est contrôlé par l'énergie disponible au moment de l'arc noté E_b et par l'inductance du circuit L , ce sont ces deux paramètres sur lesquelles l'utilisateur doit agir. La résistance R est considérée très faible et la capacité C est fonction de l'énergie E_b .

55 **[0065]** Relation entre la pression crête et le courant maximal

[0066] D'après les résultats exposés aux figures 6, 7 et 9, on peut déduire l'expression suivante :

$$P_{\max} = k_1 I_{\max} \quad (10)$$

avec k_1 fonction de la distance inter-électrodes et du mode de claquage Plus la distance inter-électrodes est grande plus le coefficient k_1 est grand D'où :

$$I_{\max} = \frac{P_{\max}}{k_1} \quad (11)$$

[0067] En remplaçant l'équation (11) dans (9) :

$$\frac{P_{\max}}{k_1} = \sqrt{\frac{2E_b}{L}} \exp^{-\frac{R\pi}{4} \sqrt{\frac{C}{L}}} \quad (12)$$

$$P_{\max} = k_1 \sqrt{\frac{2E_b}{L}} \exp^{-\frac{R\pi}{4} \sqrt{\frac{C}{L}}} \quad (13)$$

[0068] La pression crête générée est donc contrôlée par le courant i_{\max} (paramètres E_b et L) et par le coefficient k_1 (fonction de la distance inter-électrodes et le mode de rupture diélectrique de l'eau). On peut donc agir sur E_b , L et k_1 pour obtenir la pression désirée.

[0069] Relation entre le dP_{\max}/dt_p en fonction du di_{\max}/dt_i

[0070] D'après la figure 10, on peut déduire l'expression suivante :

$$\frac{dP_{\max}}{dt_p} = k_2 \frac{di_{\max}}{dt_i} \quad (14)$$

avec k_2 fonction de la distance inter-électrodes et du mode de claquage Le coefficient k_2 correspond au couplage physique électro-acoustique. En utilisant l'équation (11) et (14) :

$$k_1 \frac{di_{\max}}{dt_p} = k_2 \frac{di_{\max}}{dt_i} \quad (15)$$

$$dt_p = \frac{k_2}{k_1} dt_i \quad (15)$$

$$dt_p = \frac{k_2}{k_1} \frac{\pi \sqrt{LC}}{2} \quad (18)$$

[0071] Le front de l'onde de pression est donc contrôlé par les coefficients k_1 et k_2 et par les valeurs de L et C (paramètres du circuit électrique).

[0072] Ainsi, pour synthétiser ces études, on observe que :

- Dans les deux modes de claquage, le maximum de l'onde de pression, résultant de la rupture diélectrique de l'eau, dépend principalement de la valeur du courant maximal, appelé i_{\max} .
- Cette valeur du courant de crête est fonction de la tension de claquage et des impédances du circuit électrique. Lorsque la configuration du circuit est imposée, un moyen d'optimiser le courant est d'augmenter la tension de claquage de l'intervalle. Ceci revient à maximiser l'énergie électrique commutée dans le milieu.
- Lorsque le circuit n'est pas figé, mais que l'énergie électrique commutée est maintenue constante, l'amplitude de

l'onde pression est optimisée en réduisant l'impédance du circuit.

- La forme d'injection du courant, le mode de rupture diélectrique et la nature du liquide ont une influence sur la dynamique de l'onde de pression. Cette dynamique et le rendement acoustique du dispositif peuvent être aussi modifiés par l'injection de bulles artificielles et par la méthode de « double impulsion » (subsonique et supersonique).
- A courant injecté constant, la valeur du pic de pression est plus importante en mode supersonique qu'en mode subsonique.
- A courant injecté constant, la valeur du pic de pression est d'autant plus importante que la distance inter-électrodes est grande.

[0073] La géométrie des électrodes, à courant injecté constant, n'a pas d'influence sur la pression crête générée, mais peut jouer un rôle dans la diminution des pertes électriques en phase de pré-décharge.

[0074] En conclusion, les études ci-dessus confirment l'utilité d'introduire une inductance entre la source de tension et l'une des deux électrodes pour agir sur l'onde de pression générée au final. Les études confirment également l'intérêt d'avoir des paramètres réglables, e.g. l'inductance, la capacité du condensateur, les caractéristiques du générateur de Marx. En effet, l'onde de pression dépendant de ces paramètres, la possibilité de les régler permet de contrôler l'onde de pression.

[0075] L'amélioration de l'endommagement grâce à la régulation de la température est maintenant discutée en référence aux figures 11 à 17, qui illustrent des essais mettant en évidence cette amélioration.

[0076] Une enceinte a été développée et réalisée afin de recréer en laboratoire les conditions thermodynamiques d'un liquide en conditions de puits.

[0077] La configuration d'électrodes est composée de deux électrodes pointes (rayon de courbure de 2.5 mm) et d'une distance inter-électrodes de 3 mm. De l'eau déminéralisée ($\sigma = 40\mu\text{S/cm}$) a été utilisée de manière à augmenter la valeur de la résistance équivalente de l'enceinte et donc limiter les énergies de claquage. L'eau a été renouvelée après chaque série. Le matériau isolant utilisé pour la traversée Haute Tension est du PEEK 450G.

[0078] Dans l'objectif de limiter l'énergie injectée dans l'enceinte, les essais ont été réalisés avec un banc de condensateurs de capacité équivalente égale à $C = 600\text{nF}$. La tension de charge de ces condensateurs ne pouvait excéder 40 kV. L'énergie électrique maximale était donc d'environ 500 J, ce qui a garanti, étant donné la géométrie d'électrodes utilisées, une propagation de la décharge par mode subsonique.

[0079] La rigidité diélectrique de l'eau est caractérisée par détermination de la tension de pré-claquage U_{50} , valeur de tension qui provoque 50% de tenues et 50% d'amorçages. La méthode utilisée permettant de déterminer cette tension U_{50} est appelée « up and down ». On présélectionne des niveaux de tension et on effectue une série d'essais à ces différents niveaux, le résultat de chaque essai détermine le niveau suivant : niveau immédiatement supérieur en cas de tenue, niveau immédiatement inférieur en cas d'amorçage. Il suffit alors d'une cinquantaine d'essais pour acquérir la valeur U_{50} . Dans l'ensemble des courbes présentées, la valeur notée U_{50} représente donc la moyenne d'une série de 50 chocs.

[0080] Etant donné la géométrie complexe de la cellule, le logiciel COMSOL a été utilisé afin d'estimer la valeur de la capacité inter-électrodes pour chaque configuration expérimentale.

[0081] Les résultats donnent une capacité de 125 pF pour $D = 1,5\text{ mm}$ et de 120 pF pour $D = 3\text{mm}$. Les valeurs de capacité équivalente de la cellule HP (Haute Pression) sont de l'ordre de la centaine de pico Farad, Dans notre cas la capacité de stockage était de forte valeur égale à 600 F (décharge subsonique) : le transfert capacitif est donc optimal.

[0082] La résistance équivalente de l'eau a été déterminée en employant une méthode expérimentale et par simulation à l'aide du Logiciel COMSOL.

[0083] Lors de la décharge d'un condensateur dans l'eau, il y a une phase dite de pré-décharge durant laquelle la tension chute. Cette chute correspond à la décharge de la capacité dans la résistance équivalente du dispositif inter-électrodes. Cette résistance équivalente est appelée R_{eau} .

[0084] Dans le cas d'une décharge subsonique, R_{eau} est déterminée par mesure de la décroissance exponentielle de l'onde de tension, comme illustré par la figure 11. La valeur de la constante de décharge correspond au temps nécessaire pour une chute de 37% de la valeur de tension initiale du condensateur.

[0085] Pour un conducteur, à une température donnée, il existe une relation permettant de calculer sa résistance en fonction de ses dimensions et du matériau (ici de l'eau) qui le constitue :

$$R = \rho \frac{L}{s} \text{ avec } \rho = \frac{1}{\sigma}$$

Avec :

ρ : Résistivité de l'eau ($\Omega\cdot\text{m}$)

σ : Conductivité de l'eau (S/m)

[0086] La conductivité de l'eau étant fonction de sa température, nous pouvons définir son évolution, pour le type d'eau que nous avons utilisé dans nos expérimentations, grâce l'équation suivante :

$$\sigma = \sigma_0(1 + a(T - T_0))$$

Avec :

σ_0 : Conductivité initiale (S/m)

a : Coefficient de Température

T_0 : Température de référence (°K)

[0087] Il est important de noter que l'évolution de la conductivité de l'eau en fonction de la température n'est pas la même suivant le type d'eau utilisée (pure, déminéralisée, du robinet ou eau de mer par exemple). En effet la conductivité initiale détermine l'influence de la température vis à vis de l'évolution postérieure de la conductivité. Dans notre cas nous utilisons de l'eau déminéralisée et les paramètres initiaux ont été déterminés par expérimentation.

[0088] En utilisant le module couplage électrothermique de COMSOL, la résistance a pu être déterminée à partir de la loi d'Ohm.

[0089] Pour ce faire, un potentiel électrique à l'électrode HT a été préalablement fixé, ainsi que la conductivité de l'eau (définie par l'équation précédente). COMSOL permet de calculer la valeur du courant par intégration de la densité de courant totale sur la surface d'eau contenue dans l'enceinte et donc de déterminer la valeur de la résistance équivalente R_{eau} .

[0090] L'évolution de R_{eau} pour une plage de pression statique absolue de 0 à 15 bars est : 1750 Ω pour 0 bar, 1683 Ω pour 5 bars, 1706 Ω pour 10 bars, et 1833 Ω pour 15 bars. L'analyse de ces résultats nous permet de conclure que la pression statique n'a apparemment pas d'influence sur la résistance R_{eau} .

[0091] Les résultats expérimentaux et de simulation portant sur l'influence de la température de l'eau sur la résistance R_{eau} sont présentés à la figure 12. Les courbes obtenues montrent la grande influence de la température sur la résistance équivalente de l'enceinte. De 25°C à 95°C la valeur de la résistance est divisée par un facteur 3.

[0092] L'objectif de cette partie des essais de simulation a été de caractériser l'enceinte HP en termes de tenue en tension et d'impédance équivalente (capacité et résistance).

[0093] L'obtention de ces paramètres fondamentaux permettent de prévoir la forme d'onde susceptible d'être obtenue sur la charge (ici notre cellule HP), pour une tension appliquée (et donc une énergie), une géométrie d'électrodes et pour des conditions thermodynamiques de l'eau bien établies. Ces paramètres présentent un grand intérêt pour notre étude puisque la capacité et la résistance équivalente définissent le transfert d'énergie de la capacité de stockage vers la cellule.

[0094] Il s'agissait ensuite de caractériser la rigidité diélectrique de l'eau en fonction de ses paramètres thermodynamiques puis d'étudier l'influence de ces paramètres sur la dynamique de l'onde de pression. Un protocole expérimental a consisté à étudier l'évolution de la tension U_{50} en fonction de la température de l'eau, à la pression atmosphérique. Ces résultats sont présentés à la figure 13.

[0095] Il est établi que les processus thermiques jouent un rôle prépondérant dans la phase de pré-décharge du mode subsonique puisque l'arc électrique se développe dans des bulles de gaz créées par vaporisation de l'eau. Il est donc naturel d'observer une diminution de la tension disruptive avec l'augmentation de température. Toutefois, cette tendance est nettement accentuée dès que la température dépasse environ 60°C. En effet, pour $T < 60^\circ\text{C}$, une augmentation de 100% de la température entraîne une diminution inférieure à 10% de la valeur de U_{50} alors que pour $T > 60^\circ\text{C}$, une même variation de la température se traduit par une diminution d'environ 60% de U_{50} . Généralement dans les décharges électriques, un tel changement de pente est associé à une modification du régime de décharge. Le problème est ici plus complexe, car il met en jeu des phénomènes thermodynamiques liés au changement de phase liquide-vapeur de l'eau.

[0096] Étant donné que l'énergie de vaporisation de l'eau diminue lorsque T augmente, on peut se demander si d'un point de vue énergétique, les pertes électriques sont minimisées par cette augmentation de la température (rappelons que l'énergie acoustique de l'onde de pression dépend directement des pertes électrothermiques de la phase de pré-claquage).

[0097] Pour répondre à cette question, on peut définir l'énergie consommée E_C dans la phase de pré-claquage par :

$$E_C = \int_0^{T_b} p(t).dt = \int_0^{T_b} \frac{u^2(t)}{R_{eau}}.dt$$

5

avec $p(t)$ la puissance électrique
 $u(t)$ la tension appliquée
 R_{eau} la résistance équivalente de l'eau
 T_b l'instant du claquage

10

Or

$$u(t) = U_{50} \cdot \exp\left(\frac{-t}{R_{eau} \cdot C}\right)$$

15

$$\text{d'où } E_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{50}^2 \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T_b}{2R_{eau} C}\right) \right\} \quad (1)$$

20

[0098] L'énergie électrique totale E_T initialement stockée s'exprime par :

25

$$E_T = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{50}^2 \quad (2)$$

[0099] Les pertes électrothermiques liées au chauffage sont donc définies par :

30

$$Pertes = \frac{E_C}{E_T} = \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{T_b}{2R_{eau} C}\right) \right\} \quad (3)$$

35

[0100] Le rendement de la phase de pré-décharge s'exprime par :

$$\eta = (1 - Pertes) \times 100 \quad (4)$$

40

[0101] Les expressions (1), (2), (3) et (4) dépendent donc des trois paramètres U_{50} , T_b et R_{eau} . La résistance équivalente R_{eau} de l'enceinte d'essais se détermine expérimentalement à partir de la décroissance exponentielle de la tension appliquée illustrée sur la figure 12. Les résultats peuvent être résumés selon le tableau suivant :

45

Température (°C)	25,5	37	52,5	62	74	92
R_{eau}	1750	1200	942	867	717	583

50

[0102] La figure 14 présente l'évolution de la tension de claquage U_b et du temps T_b correspondant en fonction de la température de l'eau ainsi que les écarts-type. Lorsque la température augmente, nous savons que la valeur de R_{eau} diminue, entraînant ainsi une diminution de la durée d'application de l'onde de tension. Il est par conséquent naturel d'observer une diminution du paramètre T_b avec l'augmentation de température.

55

[0103] L'interprétation de la variation du paramètre U_b est plus délicate. Elle tient compte de la faible variation de U_{50} sur la plage 25°C - 60°C couplée à une diminution significative de la durée d'application de l'onde de tension. La tension U_b augmente donc sur cette plage de température. Au-delà de cette plage de température, la tension de claquage diminue significativement lorsque la température augmente de 60°C à 90°C. La durée d'application de la tension étant encore réduite, la tension de claquage U_b ne peut que diminuer.

[0104] L'ensemble des paramètres définis dans l'expression (1) est maintenant déterminé expérimentalement. Il est

donc possible de tracer la courbe d'évolution de l'énergie consommée E_C dans la phase de pré-décharge en fonction de la température, comme illustré à la figure 15.

[0105] L'énergie consommée pour créer l'arc électrique décroît avec la température. Pour interpréter ce résultat, on peut supposer que l'essentiel de cette énergie est consommée pour créer la phase gazeuse (hypothèse largement vérifiée par le fait que quelques dizaines de milli-joules suffisent pour initier un arc électrique dans l'air à pression atmosphérique sur des distances millimétriques). L'énergie nécessaire pour vaporiser (à pression atmosphérique constante) une masse d'eau initialement à la température T ; est donnée par l'expression:

$$E = m.c_p.(T_f - T_i) + H \quad (5)$$

Avec :

H l'enthalpie massique de vaporisation

c_p la chaleur massique isobare à la température T_i

[0106] L'enthalpie massique de vaporisation est constante à la pression de 1 bar et les variations de c_p en fonction de la température sont données par les tables de l'eau. Par conséquent, les variations de E données par l'expression (5) montrent que plus la température augmente, moins il faut fournir d'énergie pour procéder à une vaporisation d'une masse unité d'eau, comme illustré à la figure 16.

[0107] Ainsi, la décroissance de l'énergie consommée par la phase de pré-décharge avec l'augmentation de température peut être interprétée, de façon simplifiée, en termes d'énergie de vaporisation. Il est probable que cette explication ne soit pas suffisante et que d'autres paramètres entrent en jeu dans ce bilan énergétique. En particulier, pour compléter ce bilan énergétique, l'évolution du volume des bulles en fonction de la température nous semble être un paramètre important (la courbe présentée à la figure 16 est obtenue à masse constante, donc à volume constant pour toutes les températures).

[0108] Il faut également noter que la courbe présentée à la figure 16 est tracée en utilisant la tension de claquage U_{50} obtenue pour chaque température. Il s'agit de l'énergie minimale nécessaire aux phénomènes pour initier l'arc électrique. Cela signifie donc que si l'énergie E_T initialement stockée est fixée en chargeant le banc de condensateur à une tension constante, alors le surplus d'énergie ($E_T - E_C$) disponible pour la phase post-décharge augmente avec la température.

[0109] Intéressons nous maintenant au rendement énergétique de la phase de pré-décharge en fonction de la température, tel qu'illustré à la figure 17.

[0110] Les résultats expérimentaux montrent que le rendement de la pré-décharge passe par un optimum pour une température entre 45 et 67°C, ou plus précisément supérieure à 50°C et/ou inférieure à 62°C. Cet optimum de rendement résulte principalement du changement de pente de la courbe $U_{50} = f(T)$ pour $T > 60^\circ\text{C}$ alors que l'énergie consommée reste quasi constante.

[0111] Pour $T \approx 60^\circ\text{C}$, environ 80% de l'énergie est disponible pour la phase post-décharge, dont une partie sera transformée en énergie acoustique. Seulement 30% de l'énergie initiale est disponible pour la phase de post-décharge si la température de l'eau est fixée à pour $T = 25^\circ\text{C}$. Ce résultat est donc très intéressant dans l'objectif d'optimiser le rendement électro-acoustique du procédé de fracturation électrique.

[0112] L'étude ci-dessus, illustrée par les figures 11 à 17, montre donc l'intérêt de la régulation de la température du fluide dans l'espace confiné pour améliorer le rendement énergétique et induire une onde de pression, les dimensions du dispositif étant fixées, permettant un meilleur endommagement.

[0113] Comme mentionné précédemment, le dispositif de fracturation peut être utilisé dans un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures. Le procédé comprend la fracturation électrique du réservoir par la génération d'un arc électrique par le dispositif, ce qui induit une onde de pression entraînant la fracturation. Simultanément, le procédé peut comprendre la régulation de la température d'un fluide dans l'espace confiné du dispositif, grâce à l'appareil de régulation de la température. Ainsi, le dispositif peut également être utilisé dans un procédé de production d'hydrocarbures comprenant la fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures suivant le procédé précédent.

[0114] En référence à la figure 18, il est également proposé un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures. Le procédé de la figure 18 comprend une fracturation statique (S20) du réservoir par pression hydraulique. Et le procédé de la figure 18 comprend également, avant, pendant ou après la fracturation statique (S20) (ces trois possibilités étant représentées par les pointillés sur la figure 18), la fracturation électrique (S10) du réservoir par génération d'un arc électrique dans un puits foré dans le réservoir, telle que décrite ci-dessus. Le procédé de la figure 18 améliore la fracturation du réservoir.

[0115] La fracturation statique (S20) peut être tout type de fracturation statique connue de l'art antérieur. De manière générale, la fracturation statique (S20) peut comprendre, après l'éventuel forage d'un puits dans le réservoir, l'injection d'un fluide sous haute pression dans le puits. La fracturation statique (S20) crée ainsi une ou plusieurs fissures unidi-

rectionnelles, typiquement plus profondes que celles créées par la fracturation électrique (S10).

[0116] Le fluide peut être de l'eau, une boue ou un fluide technique à viscosité contrôlée enrichi en agents durs (grains de sable tamisé, ou microbilles de céramique) qui empêchent que le réseau de fracture se referme sur lui-même au moment de la chute de pression.

[0117] La fracturation statique (S20) peut comprendre une première phase d'injection dans un puits foré d'un fluide de fracturation qui contient des épaississants, et une deuxième phase qui implique l'introduction périodique de propant (i.e. un agent de soutènement) dans le fluide de fracturation pour alimenter la fracture créée en propant. Ainsi, on forme des clusters de propant dans la fracture qui empêchent celle-ci de se refermer et fournissent des chenaux pour l'écoulement de l'hydrocarbure entre les clusters. La deuxième phase ou ses sous phases implique l'introduction supplémentaire d'un matériau de renforcement et/ou de consolidation, pour ainsi accroître la force des clusters de propant formés dans le fluide de fracturation. Une telle fracturation statique (S20) permet d'obtenir des fractures typiquement entre 100 et 5000 mètres.

[0118] La fracturation statique (S20) peut précéder la fracturation électrique (S10). Dans un tel cas, l'onde de pression générée par la fracturation électrique (S10) peut suivre le cours du fluide introduit dans les fissures créées par la fracturation statique (S20) et ainsi améliorer l'endommagement. Par ailleurs, un tel ordre entre les fracturations (S20) et (S10) présente peu de risques de fuites. Par exemple, la fracturation statique (S20) peut précéder la fracturation électrique (S10) de moins d'une semaine.

[0119] En référence à la figure 19, il est également proposé un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures préalablement fracturé statiquement par pression hydraulique. Le procédé de la figure 19 comprend alors la seule fracturation électrique (S10) du réservoir, effectuée dans un réservoir où un puits a déjà été foré et a déjà été fracturé statiquement. Le procédé de la figure 19 permet l'endommagement de réservoirs déjà exploités après fracturation statique. En d'autres termes, le procédé de la figure 19 permet l'exploitation d'un réservoir abandonné car déjà exploité, potentiellement en réutilisant un puits déjà foré. Il est à noter que, s'il est combiné à cette fracturation statique préalable, le procédé de la figure 19 correspond au procédé de la figure 18 (où la fracturation statique (S20) correspond à cette fracturation statique préalable). Ainsi, la fracturation statique préalable peut avoir été effectuée selon le procédé de la figure 18.

[0120] En référence à la figure 20, il est proposé un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures comprenant une fracturation électrique (S10) particulière. La fracturation électrique (S10) proposée dans le procédé de la figure 20 peut bien entendu être utilisée dans le procédé de la figure 18 et/ou dans le procédé de la figure 19. Le procédé de la figure 20 comprend principalement la fracturation électrique (S10) du réservoir par la génération d'un arc électrique dans un fluide présent dans un puits foré dans le réservoir (donc combinée ou non à une fracturation statique, par exemple la fracturation statique (S20) du procédé de la figure 1). L'arc électrique induit une onde de pression dont le temps de montée est supérieur à 0,1 μ s, de préférence supérieur à 10 μ s. Le procédé de la figure 20 améliore la fracturation du réservoir.

[0121] Le temps de montée de l'onde de pression est le temps nécessaire pour que l'onde de pression atteigne le pic de pression, i.e. la valeur maximale de l'onde (également appelé « pression de crête »). En l'occurrence, un temps de montée supérieur à 0,1 μ s, de préférence supérieur à 10 μ s, correspond à une onde de pression qui pénètre mieux dans le réservoir. Une telle onde de pression est particulièrement efficace (i.e. l'onde pénètre plus profondément) dans le cas de matériaux peu ductiles, comme ceux qui composent les réservoirs de gaz de schiste. De préférence, le temps de montée est inférieur à 1 ms, avantageusement inférieur à 500 μ s.

[0122] L'onde de pression peut présenter une pression maximale allant jusqu'à 10 kbar, de préférence supérieure à 100 bar et/ou inférieure à 1000 bar. Cela peut correspondre à une énergie stockée entre 10 J et 2 MJ, de préférence entre 10 kJ et 500 kJ.

[0123] Différentes possibilités applicables à l'un quelconque des procédés de la figure 18, de la figure 19 ou de la figure 20 vont maintenant être décrites.

[0124] Le puits peut être horizontal. Par exemple, le puits peut être horizontal et présenter une longueur comprise de préférence entre 500 et 5000 m, avantageusement entre 800 et 1200 m, par exemple à une profondeur entre 1000 et 10000 m, par exemple entre 3000 et 5000 m.

[0125] La fracturation électrique (S10) peut être répétée en différentes zones de traitement le long du puits. On a en effet avec la fracturation électrique (S10) une onde de pression qui pénètre généralement moins profondément qu'une fracturation statique. Ainsi, on obtient typiquement avec la fracturation électrique (S10) des fissures de longueur inférieure à 100 m, typiquement inférieure à 50 m, et typiquement supérieure à 20 m. Pour un puits faisant plusieurs centaines de mètres, la répétition de la fracturation électrique (S10) le long du puits permet un endommagement tout le long du puits et donc une meilleure exploitation éventuelle du réservoir.

[0126] Par ailleurs, en chaque zone de traitement (ou en l'unique zone de traitement si celle-ci est unique), plusieurs arcs peuvent être générés à la suite. Ici, on répète la génération d'un arc électrique en une position sensiblement fixe. On améliore ainsi l'endommagement en répétant l'onde de pression. Les arcs générés peuvent être les mêmes ou bien différents. Par exemple, en chaque zone de traitement, les arcs générés à la suite induisent une onde de pression dont

le temps de montée un temps de montée est décroissant. Par exemple, les arcs à la suite peuvent présenter un front de plus en plus raide, induisant ainsi une onde de pression ayant un temps de montée de plus en plus rapide. Dans un tel cas, les premières impulsions ont des fronts plus lents pour pénétrer profondément, tandis que les impulsions aux fronts plus raidis fracturent plus proche du puits et de manière plus dense. On optimise ainsi l'endommagement. Les premiers arcs peuvent par exemple induire une onde de pression dont le temps de montée est supérieur à 10 μ s, de préférence 100 μ s. Les derniers arcs peuvent alors induire une onde de pression dont le temps de montée est inférieur au temps de montée des premiers arcs, par exemple inférieur à 10 μ s ou 100 μ s. Les premiers arcs comprennent au moins un arc, de préférence un nombre inférieur à 10000 voire 1000, et les derniers arcs comprennent au moins un arc, de préférence un nombre inférieur à 10000 voire 1000.

[0127] Par ailleurs, en chaque zone de traitement, les arcs peuvent être générés à une fréquence inférieure à 100 Hz, de préférence inférieure à 10 Hz, et/ou supérieure à 0,001 Hz, de préférence supérieure à 0,01 Hz. De préférence, la fréquence des arcs peut être (sensiblement) égale à la fréquence de résonance du matériau à fracturer dans le réservoir. Ceci assure un endommagement plus efficace.

[0128] Le réservoir peut avoir une perméabilité inférieure à 10 microdarcy. Il peut s'agir notamment d'un réservoir de gaz de schiste. Dans ce type de réservoirs, le gaz est typiquement adsorbé (jusqu'à 85% sur Lewis Shale) et faiblement piégé dans des pores. La faible perméabilité de ce type de réservoir ne permet pas d'espérer produire directement des gaz piégés dans un tel milieu, seul le gaz de surface (gaz adsorbé) peut être produit. Ainsi, pour un réservoir de shale gas où la perméabilité est de l'ordre du microdarcy, une fracturation électrique (S10) efficace sur un rayon de 30 m le long d'un puits horizontal de 1000 m permettrait une récupération de gaz pouvant dépasser 50 MNm³ (si l'on prend pour hypothèse 26 Nm³ de gaz par m³ de roche comme le suggère l'article « Porosity and permeability of Eastern Devonian Shale gas » précité). Le procédé de fracturation de l'une quelconque des figures 1 à 3 peut ainsi être inclus dans un procédé de production d'hydrocarbures du réservoir, typiquement à shale gas.

[0129] La génération de l'arc électrique peut induire un gradient de température générant une onde de pression dans le fluide. La fracturation électrique (S10) peut comprendre l'injection préalable dans le fluide d'un agent améliorant la plasticité du matériau constituant le réservoir. L'agent peut comprendre un additif chimique. L'additif chimique peut être un agent induisant la fracture rocheuse. L'additif peut comprendre de la vapeur. Cela permet d'améliorer encore la fracturation.

[0130] Un exemple de la fracturation électrique (S10) du procédé de fracturation de l'une quelconque des figures 18 à 20 va maintenant être décrit en référence aux figures 21 à 23. Dans cet exemple, on procède à la fracturation électrique (S10) d'un réservoir 40 dans lequel un puits horizontal 43 a été foré. La fracturation électrique (S10) est ici combinée à une fracturation statique, non spécifiquement illustrée et éventuellement préalable, qui a induit des fractures principales 41 dans le réservoir. Le procédé de fracturation permet ici de produire de l'hydrocarbure grâce à un pipe de production situé à la surface, en tête de puits 45. L'arc électrique est ici généré au niveau d'un dispositif de fracturation 47, qui peut être conforme au dispositif de fracturation 100 de la figure 1.

[0131] Dans l'exemple des figures 21 à 23, la fracturation électrique (S10) induit des fractures secondaires 42 au niveau de l'endroit où l'arc est généré. Dans l'exemple, les fractures secondaires 42 sont moins longues mais plus diffuses que les fractures principales 41. Dans cet exemple, la fracturation électrique (S10) est répétée en différentes zones de traitement le long du puits. La figure 21 montre en effet une phase initiale de la fracturation électrique (S10) en fond de puits. La figure 22 montre une phase intermédiaire en milieu de puits. Et la figure 23 montre une phase finale en début de puits. On observe ainsi la progression des fractures secondaires 42 durant la répétition de la fracturation électrique. Ainsi, les fractures secondaires 42 sont dispersées tout autour du puits 43. On peut alors récupérer l'hydrocarbure environnant ces fractures secondaires 42, hydrocarbure potentiellement éloigné des fractures principales 41 et donc difficilement récupérable par une seule fracturation statique.

[0132] La mobilité du dispositif de fracturation 47, qui peut être le dispositif particulier, permet de fracturer le réservoir tout le long du puits. Le dispositif 47 est alimenté dans cet exemple par une alimentation haute tension 44 localisée à la surface et reliée au dispositif 47 par les câbles 46.

[0133] Bien entendu, la présente invention n'est pas limitée aux exemples décrits et représentés, mais elle est susceptible de nombreuses variantes accessibles à l'homme de l'art. Par exemple, les principes exposés ci-dessus peuvent être appliqués à la production de données sismiques. En effet, la génération de l'arc électrique pourrait alternativement induire une onde de pression présentant des caractéristiques inférieures à celles nécessaires à la fracturation du réservoir. Cela est réalisable par exemple en adaptant la tension de charge du dispositif de fracturation et la tension de charge, et en jouant sur l'inductance. Un tel procédé de productions de données sismiques peut alors comprendre la réception d'une réflexion de l'onde de pression, l'onde réfléchie étant alors typiquement modulée par son passage à travers le matériau constituant le réservoir. Le procédé de production de données sismiques peut alors également comprendre l'analyse de l'onde réfléchie pour déterminer des caractéristiques du réservoir. On peut alors constituer un relevé sismique basé sur la réception.

Revendications

1. Dispositif (100) de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures, dans lequel le dispositif comprend :
 - - deux garnitures d'étanchéité (102, 103) définissant entre elles un espace confiné (104) dans un puits foré dans le réservoir ;
 - - un appareil de régulation de la température d'un fluide dans l'espace confiné ;
 - - une paire de deux électrodes (106) agencées dans l'espace confiné ; et
 - - un circuit électrique pour la génération d'un arc électrique entre les deux électrodes, le circuit comprenant au moins une source de tension (112, 118) reliée aux électrodes (106) le dispositif **caractérisé en ce qu'il** comprend en outre une bobine d'inductance (110) entre la source de tension (112, 118) et l'une des deux électrodes.
2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel l'appareil de régulation de la température régule la température du fluide pour optimiser le rendement énergétique de la phase de pré-décharge lors de la génération d'un arc électrique.
3. Dispositif selon la revendication 2, dans lequel l'appareil de régulation de la température maintient la température du fluide à une valeur comprise entre 45 et 67°C, de préférence supérieure à 50°C et/ou inférieure à 62°C.
4. Dispositif selon la revendication 3, dans lequel le dispositif comprend en outre un appareil de régulation de la pression du fluide sensiblement à la pression atmosphérique.
5. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'appareil de régulation de la température comprend un système de refroidissement de fluide.
6. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la bobine d'inductance (110) est d'inductance réglable, de préférence comprise entre 1 µH et 100 mH, encore de préférence comprise entre 10 µH et 1 mH.
7. Dispositif l'une des revendications précédentes, dans lequel la source de tension comprend un condensateur (112) de capacité supérieure à 1 µF, de préférence supérieure à 10 µF.
8. Dispositif selon la revendication 7, dans lequel la capacité du condensateur est réglable, de préférence inférieure à 1000 µF, encore de préférence inférieure à 200 µF.
9. Dispositif selon la revendication 7 ou 8, dans lequel le circuit comprend en outre un générateur de Marx (118) et des ferrites (119) formant une inductance saturable dans un chemin menant le condensateur directement à l'inductance, les ferrites étant saturées une fois le générateur de Marx déchargé.
10. Dispositif selon la revendication 7, 8 ou 9, dans lequel le condensateur est séparé de l'inductance par un éclateur (114) amorçable par un générateur d'impulsions (116).
11. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les électrodes (106) ont un rayon compris entre 0,1 mm et 50 mm, de préférence entre 1 mm et 30 mm.
12. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le dispositif comprend plusieurs paires d'électrodes.
13. Procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures, dans lequel le procédé comprend la fracturation électrique (S 10) du réservoir par la génération d'un arc électrique par le dispositif selon l'une des revendications précédentes et, simultanément, la régulation de la température d'un fluide dans l'espace confiné du dispositif.
14. Procédé de production d'hydrocarbures, comprenant la fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures selon le procédé de la revendication 13.
15. Procédé de calibrage de l'appareil de régulation de la température du dispositif selon l'une des revendications 1 à 12, comprenant les étapes consistant à :
 - fournir le dispositif, déterminer une tension de pré-claquage au-delà de laquelle l'arc électrique est généré, puis

- mesurer une tension de claquage aux bornes des électrodes et un temps de claquage en fonction de la température du fluide, en appliquant la tension de pré-claquage et en faisant varier la température du fluide, puis
- déduire de l'étape précédente le rendement énergétique de la phase de pré-décharge en fonction de la température, puis
- définir une température ou un intervalle de températures cible pour l'appareil de régulation de la température en fonction d'un maximum du rendement énergétique déduit à l'étape précédente.

Patentansprüche

1. Vorrichtung (100) zur Frakturierung einer geologischen Kohlenwasserstofflagerstätte, wobei die Vorrichtung folgendes umfasst:
 - zwei Dichtungen (102, 103) die zwischen einander einen geschlossenen Raum (104) in einem Bohrloch im Reservoir definieren;
 - ein Gerät zur Temperaturregelung eines Fluids innerhalb des geschlossenen Raums;
 - ein, im geschlossenen Raum angeordnetes Elektrodenpaar (106); und
 - eine elektrische Schaltung zur Erzeugung eines elektrischen Lichtbogens zwischen den beiden Elektroden, wobei die Schaltung mindestens eine, mit den Elektroden (106) verbundene Spannungsquelle (112, 118) umfasst, wobei die Vorrichtung **dadurch gekennzeichnet ist, dass** sie ferner eine Induktivitätsspule (110) zwischen der Spannungsquelle (112, 118) und einer der beiden Elektroden umfasst.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei das Temperaturregelungsgerät die Temperatur des Fluids regelt, um bei der Erzeugung eines elektrischen Lichtbogens die Energieeffizienz der Vorladungsphase zu optimieren.
3. Vorrichtung nach Anspruch 2, wobei das Temperaturregelungsgerät die Temperatur des Fluids einen, zwischen 45 und 67°C, vorzugsweise höher als 50°C und/oder niedriger 62°C liegenden Wert hält.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, wobei die Vorrichtung ferner ein Gerät zur Regelung des Fluiddrucks, im Wesentlichen auf den Atmosphärendruck, umfasst.
5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Temperaturregelungsgerät ein Fluidkühlsystem umfasst.
6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Induktivitätsspule (110) von kontrollierbarer Induktivität ist, die vorzugsweise zwischen 1 μ H und 100 mH, noch bevorzugter zwischen 10 μ H und 1 mH liegt.
7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Spannungsquelle einen Kondensator (112) mit einer Kapazität von über 1 μ F, vorzugsweise von über 10 μ F umfasst.
8. Vorrichtung nach Anspruch 7, wobei die Kapazität des Kondensators vorzugsweise auf weniger als 1000 μ F, noch bevorzugter auf weniger als 200 μ F einstellbar ist.
9. Vorrichtung nach Ansprüchen 7 oder 8, wobei die Schaltung ferner einen Marx-Generator (118) und Ferrite (119) die eine sättigbare Induktivität in einem Weg bilden der den Kondensator direkt zur Induktivität führt, umfasst, wobei die Ferrite gesättigt sind sobald der Marx-Generator entladen ist.
10. Vorrichtung nach Ansprüchen 7, 8 oder 9, wobei der Kondensator mittels einer, durch einen Impulsgenerator (116) zündbaren Funkenstrecke (114) von der Induktivität getrennt ist.
11. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Elektroden (106) einen, im Bereich von 0,1 mm und 50 mm, vorzugsweise von 1 mm und 30 mm liegenden Radius aufweisen.
12. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Vorrichtung mehrere Elektrodenpaare umfasst.
13. Verfahren zur Frakturierung einer geologischen Kohlenwasserstofflagerstätte, wobei das Verfahren die elektrische Frakturierung (S 10) der Lagerstätte durch die Erzeugung eines elektrischen Lichtbogens, mittels der Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche und, gleichzeitig, die Temperaturregelung eines Fluids innerhalb des

geschlossenen Raums der Vorrichtung umfasst.

14. Verfahren zur Herstellung von Kohlenwasserstoff, welches die Frakturierung einer geologischen Kohlenwasserstofflagerstätte nach Anspruch 13 umfasst.

15. Verfahren zum Kalibrieren des Temperaturregelungsgeräts der Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, das die folgenden Schritte umfasst:

- das Bereitstellen der Vorrichtung, das Bestimmen einer Vor-Durchschlagspannung oberhalb welcher der elektrische Lichtbogen erzeugt wird, dann
- das Messen der Durchschlagspannung an den Elektrodenanschlüssen und der Durchschlagzeit, in Abhängigkeit von der Temperatur des Fluids, unter Anwendung der Vor-Durchschlagspannung und durch das Verändern der Temperatur des Fluids, dann
- das Ableiten der Energieeffizienz der Vorentladungsphase vom vorhergehenden Schritt, in Abhängigkeit von der Temperatur, dann
- das Definieren einer Zieltemperatur oder eines Zieltemperaturbereichs für das Temperaturregelungsgerät, in Abhängigkeit von einer maximalen, im vorhergehenden Schritt abgeleiteten, Energieeffizienz.

Claims

1. A device (100) for fracturing a geological hydrocarbon reservoir wherein the device comprises:

- two packers (102, 103) defining a confined space (104) therebetween in a well drilled in the reservoir;
- an apparatus to regulate the temperature of a fluid in the confined space;
- a pair of two electrodes (106) arranged in the confined space; and
- an electric circuit to generate an electric arc between the two electrodes, the circuit comprising at least one voltage source (112, 118) connected to the electrodes (106) the device being **characterized in that** it further includes an inductor coil (110) between the voltage source (112, 118) and one of the two electrodes.

2. The device according to claim 1, wherein the temperature regulating apparatus regulates the temperature of the fluid to optimise the energy yield of the pre-discharge phase at the time of electric arc generation.

3. The device according to claim 2, wherein the temperature regulating apparatus holds the temperature of the fluid at a value between 45 and 67°C, preferably higher than 50°C and/or lower than 62°C.

4. The device according to claim 3, wherein the device further comprises an apparatus for regulating the pressure of the fluid at substantially atmospheric pressure.

5. The device according to one of the preceding claims, wherein the temperature regulating apparatus comprises a fluid cooling system.

6. The device according to one of the preceding claims, wherein the inductor coil (110) has adjustable inductance, preferably between 1 μ H and 100 mH, more preferably between 10 μ H and 1 mH.

7. The device according to one of the preceding claims, wherein the voltage source comprises a capacitor (112) having capacitance higher than 1 μ F, preferably higher than 10 μ F.

8. The device according to claim 7, wherein the capacitance of the capacitor is adjustable, preferably lower than 1000 μ F, more preferably lower than 200 μ F.

9. The device according to claim 7 or 8, wherein the circuit further comprises a Marx generator (118) and ferrites (119) forming a saturable inductor on a pathway leading the capacitor directly to the inductor, the ferrites being saturated once the Marx generator is discharged.

10. The device according to claim 7, 8 or 9, wherein the capacitor is separated from the inductor by a spark gap (114) able to be primed by a pulse generator (116).

11. The device according to one of the preceding claims, wherein the electrodes (106) have a radius of between 0.1 mm and 50 mm, preferably between 1 mm and 30 mm.

12. The device according to one of the preceding claims, wherein the device comprises several pairs of electrodes.

13. A method for fracturing a geological hydrocarbon reservoir wherein the method comprises electric fracturing (S10) of the reservoir by generating an electric arc with the device according to one of the preceding claims, and simultaneously regulating the temperature of a fluid in the confined space of the device.

14. A method for producing hydrocarbons comprising the fracturing of a geological hydrocarbon reservoir using the method according to claim 13.

15. A method for calibrating the temperature regulating apparatus of the device according to one of claims 1 to 12, comprising the steps of:

- providing the device; determining a pre-breakdown voltage above which the electric arc is generated; then
- measuring a breakdown voltage at the terminals of the electrodes and a breakdown time as a function of the temperature of the fluid, by applying the pre-breakdown voltage and varying the temperature of the fluid;
- inferring from the preceding step the energy yield of the pre-discharge phase as a function of the temperature; then
- defining a target temperature or temperature range for the temperature regulating apparatus as a function of the maximum energy yield inferred at the preceding step.

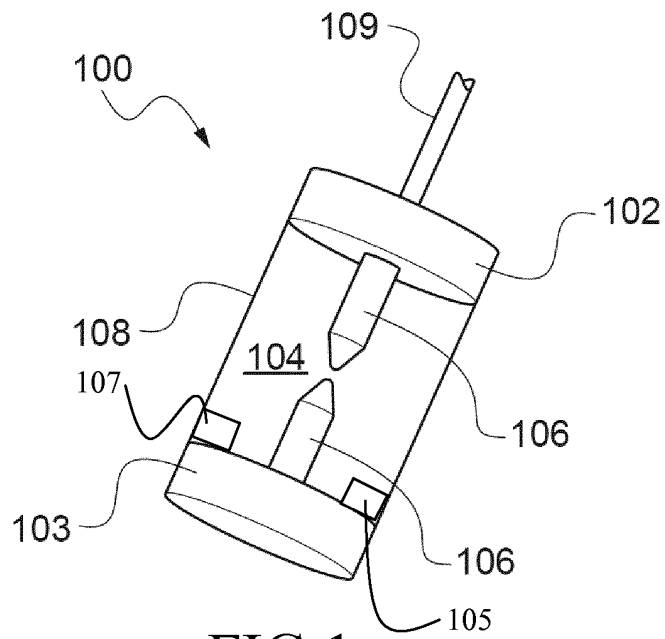


FIG. 1

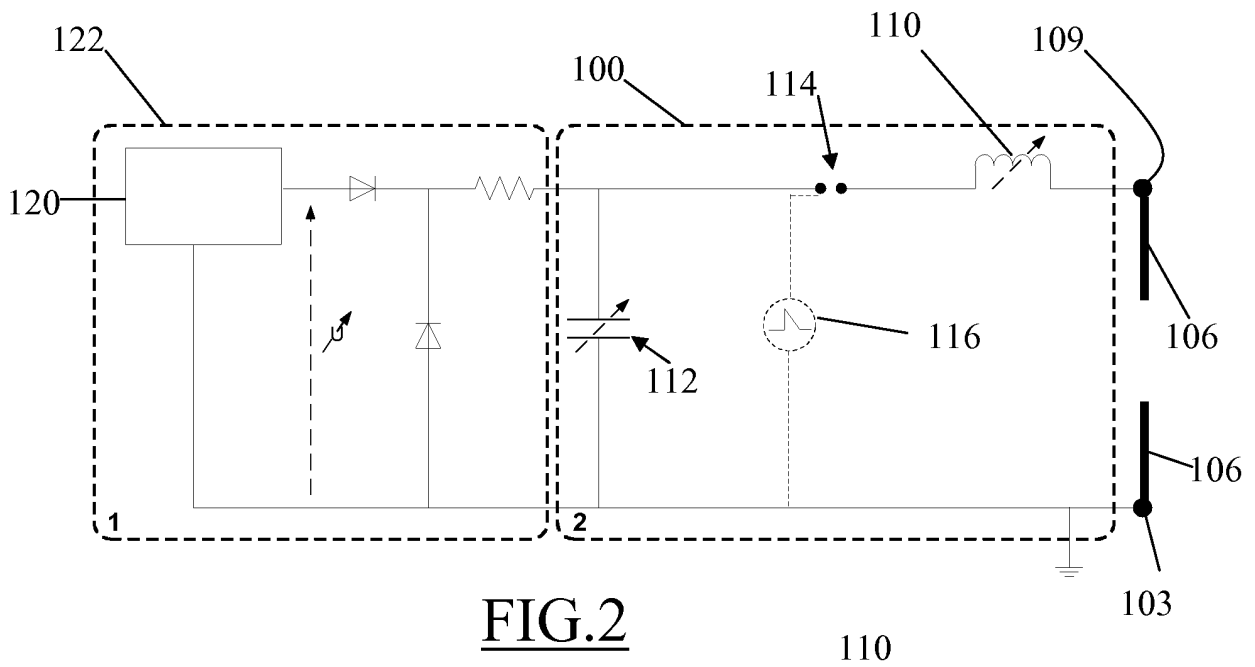


FIG. 2

FIG.3

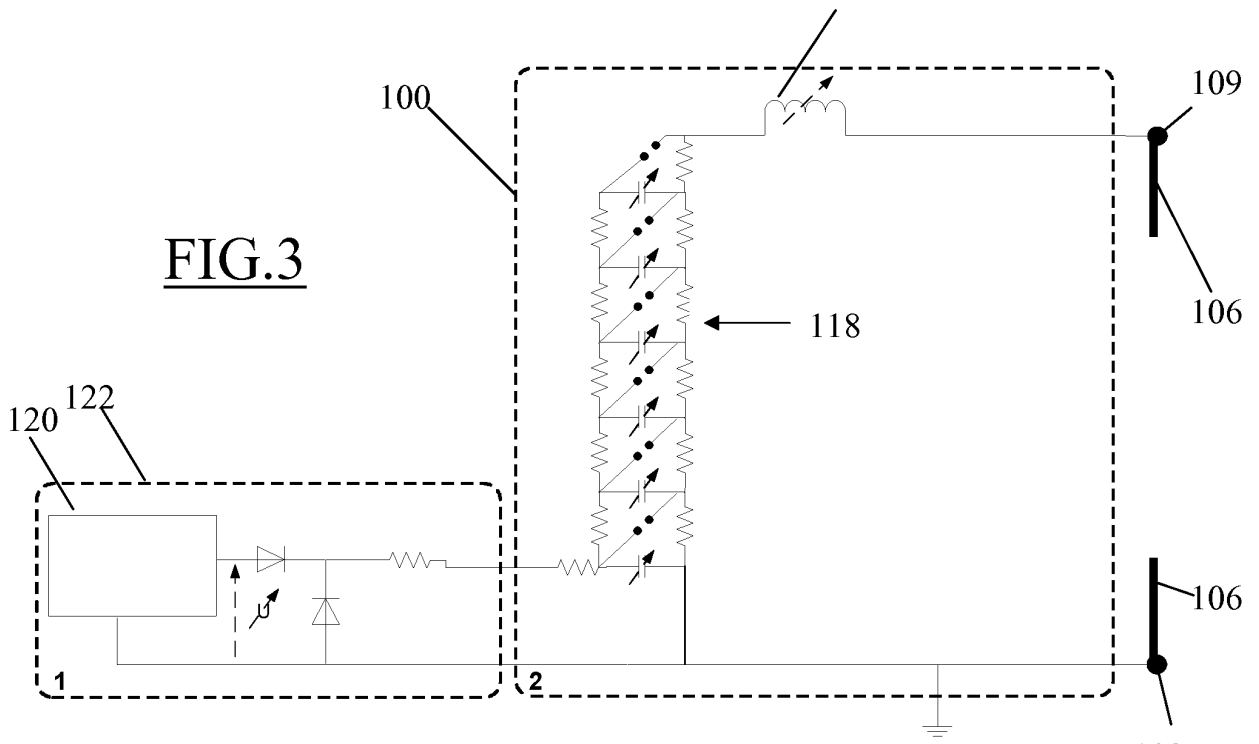
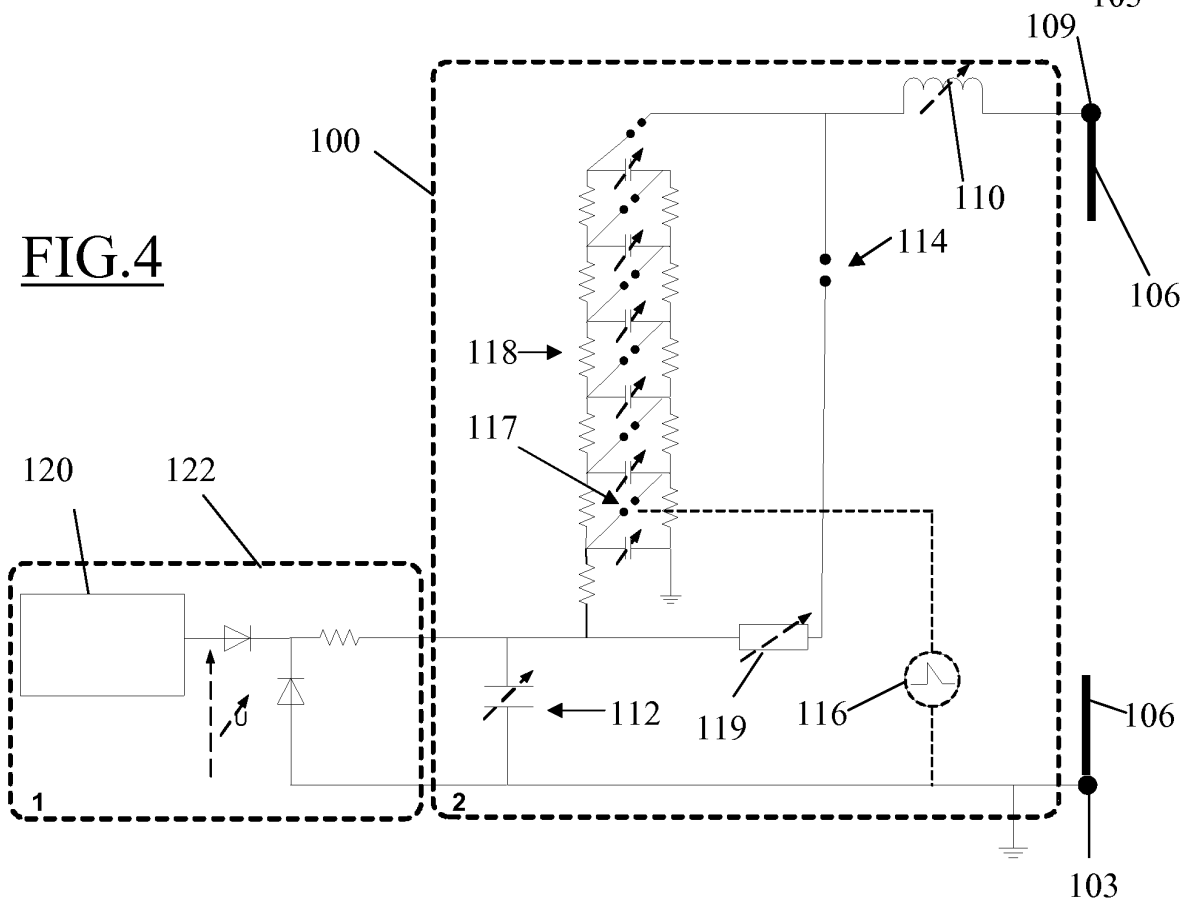


FIG.4



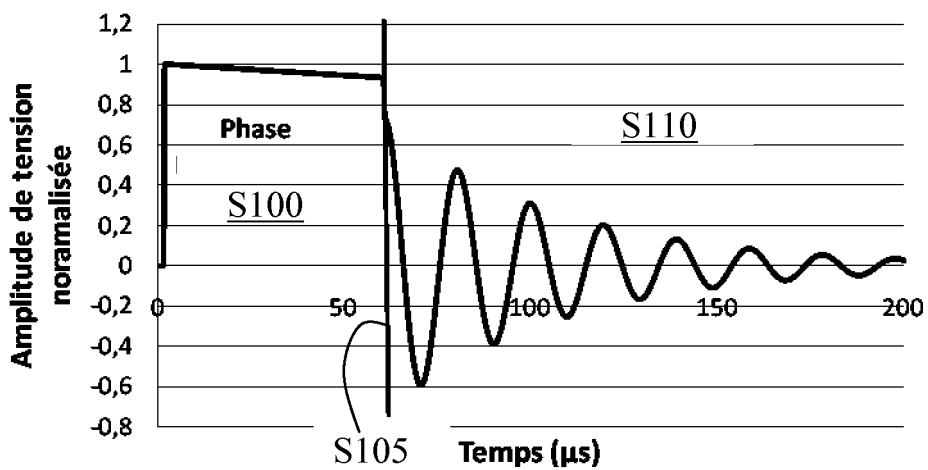


FIG.5

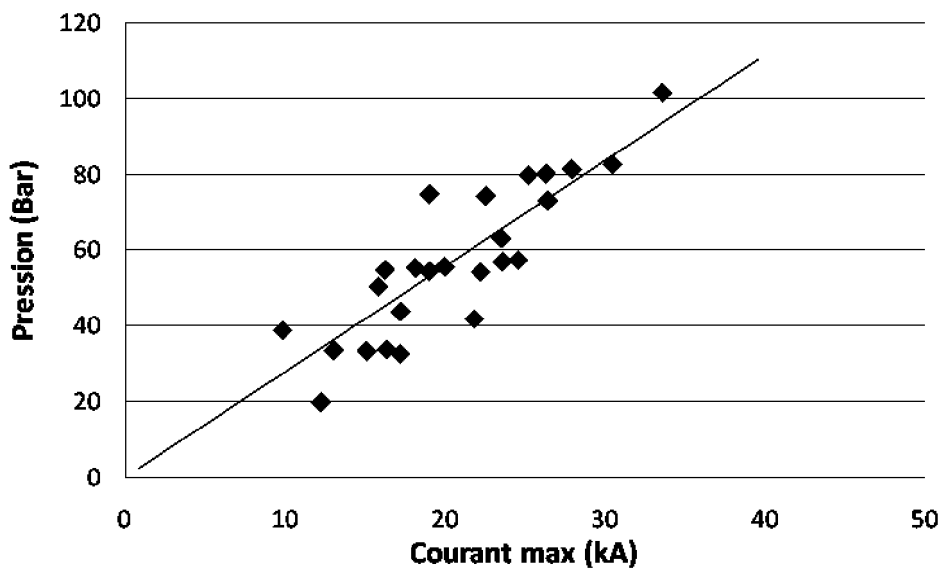


FIG.6

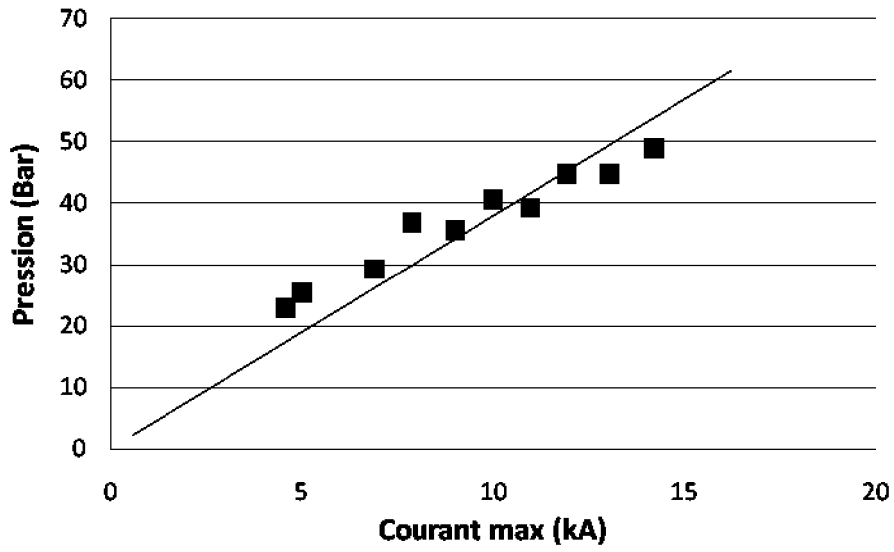


FIG.7

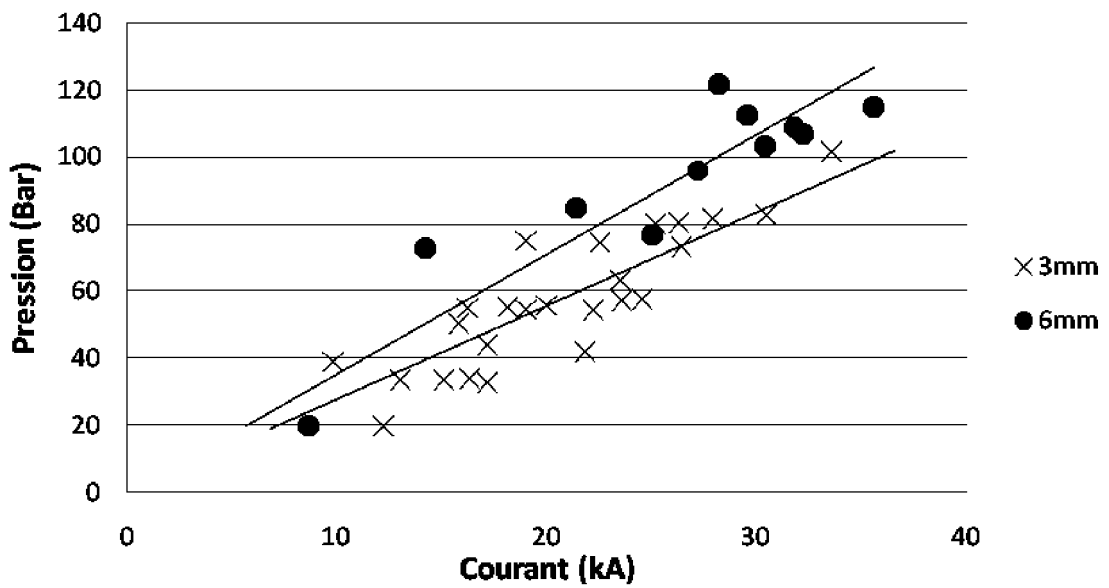


FIG.8

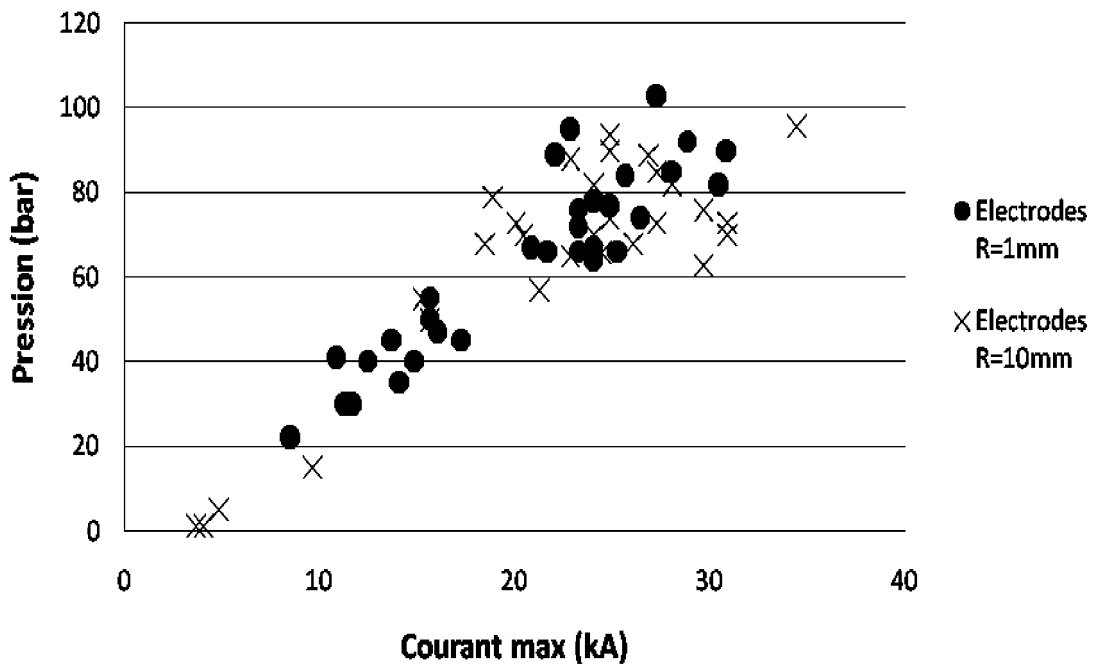


FIG.9

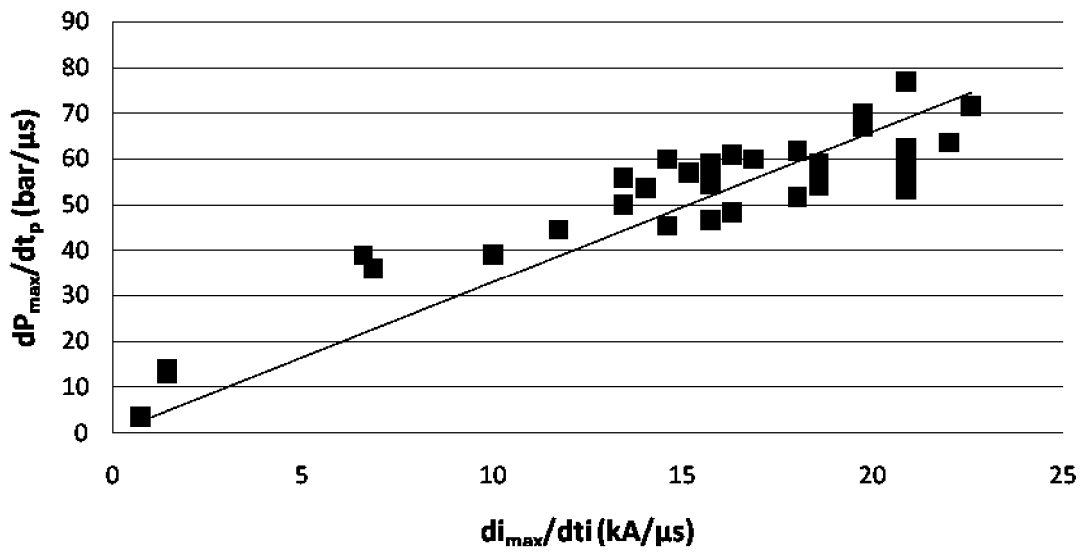


FIG.10

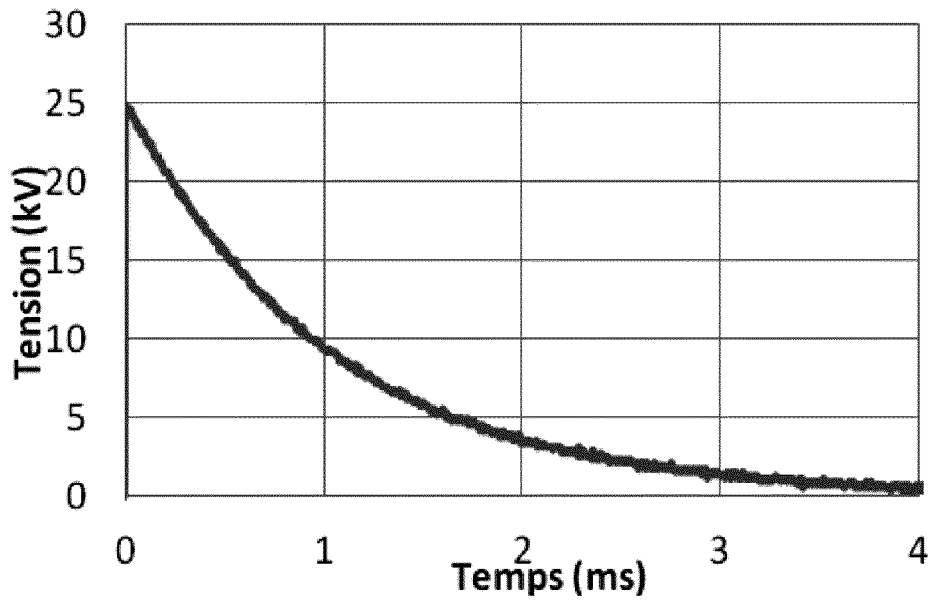


FIG.11

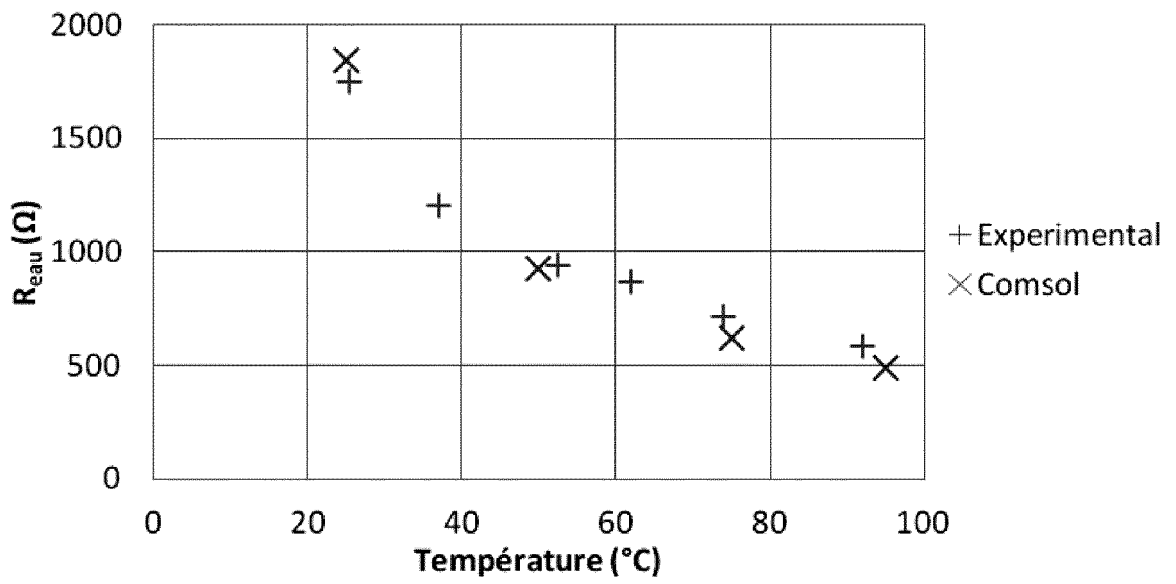


FIG.12

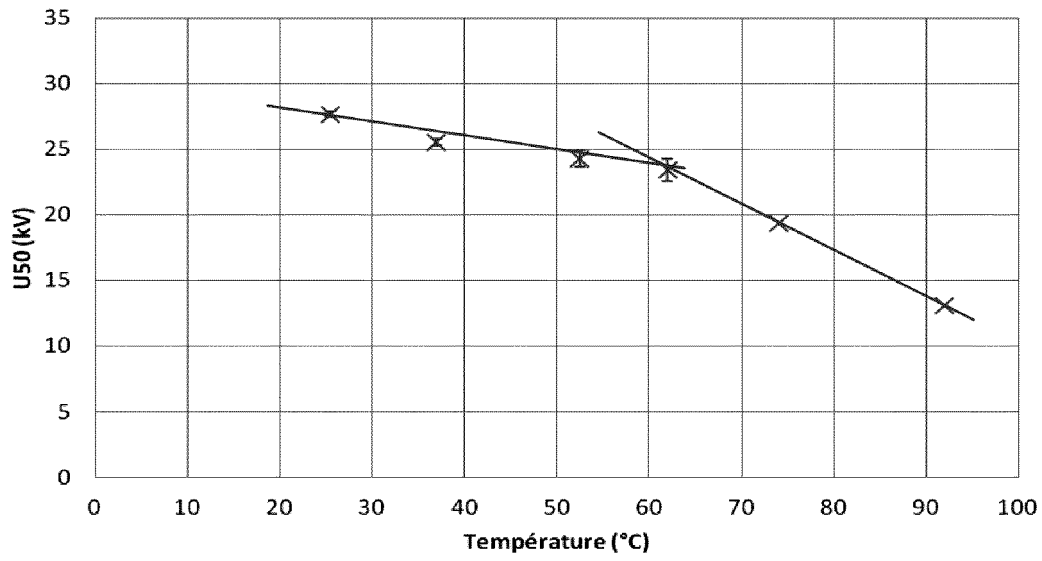


FIG.13

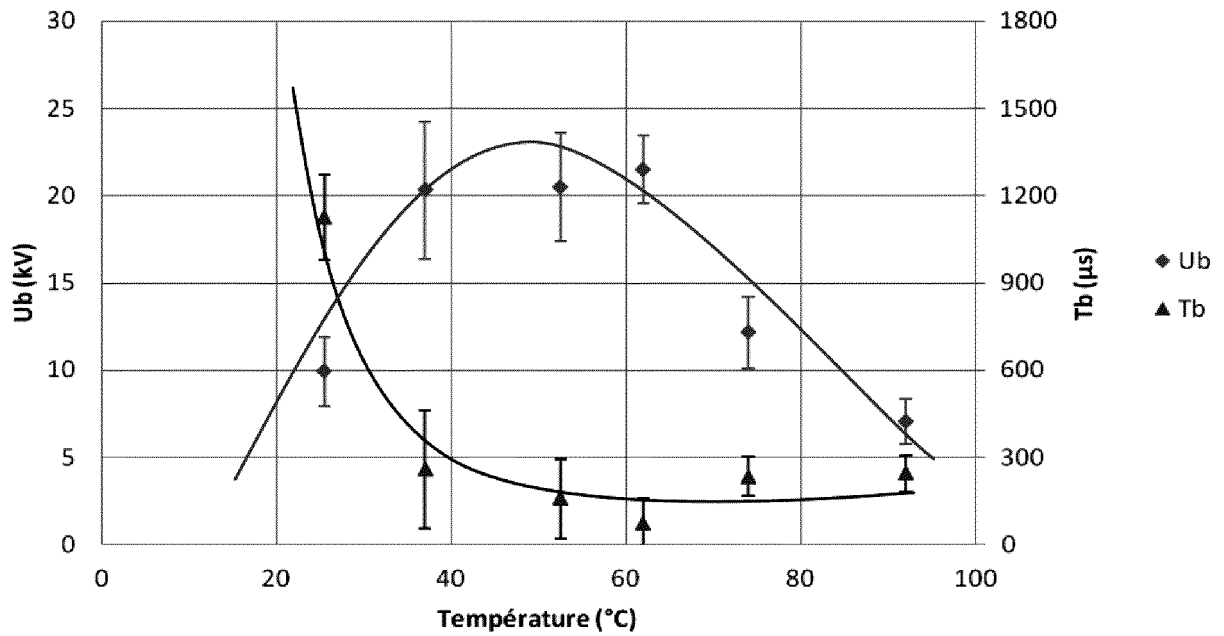


FIG.14

FIG.15

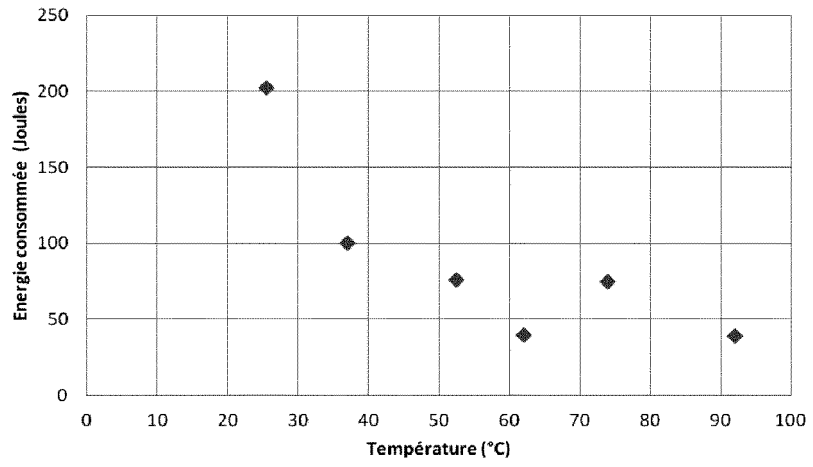


FIG.16

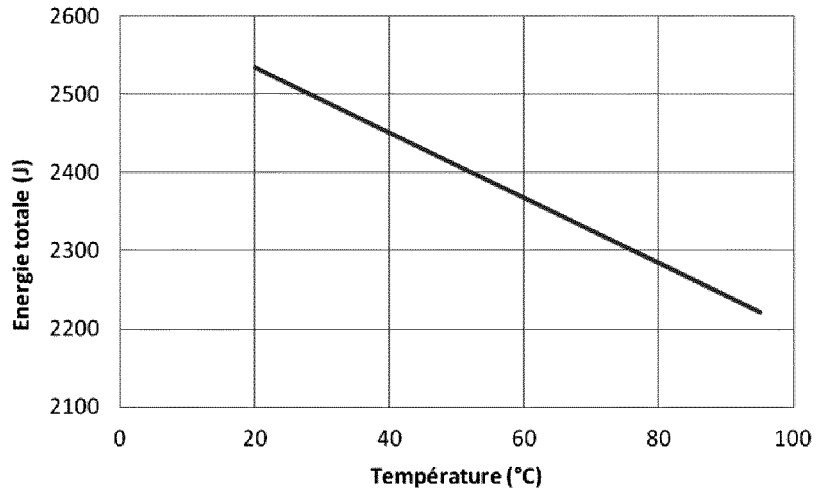
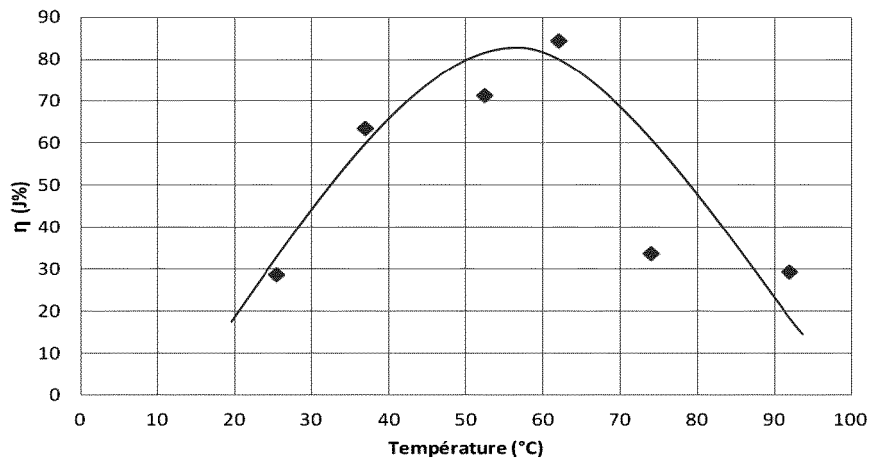


FIG.17



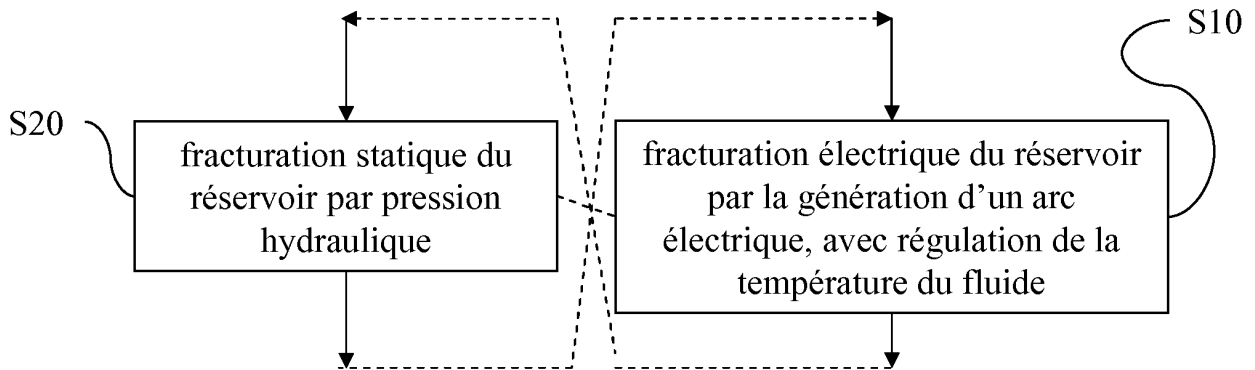


FIG.18

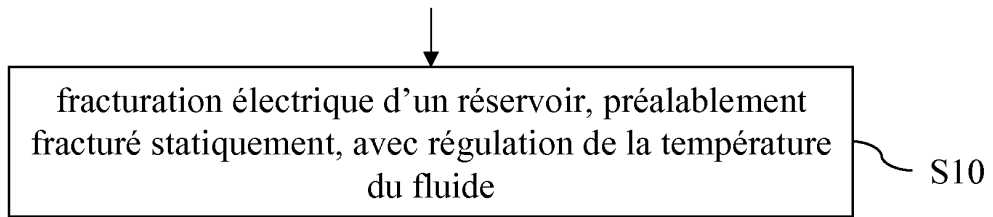


FIG.19

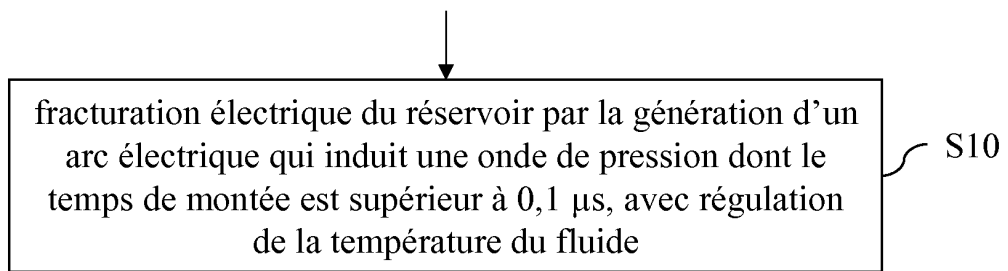


FIG.20

FIG.21

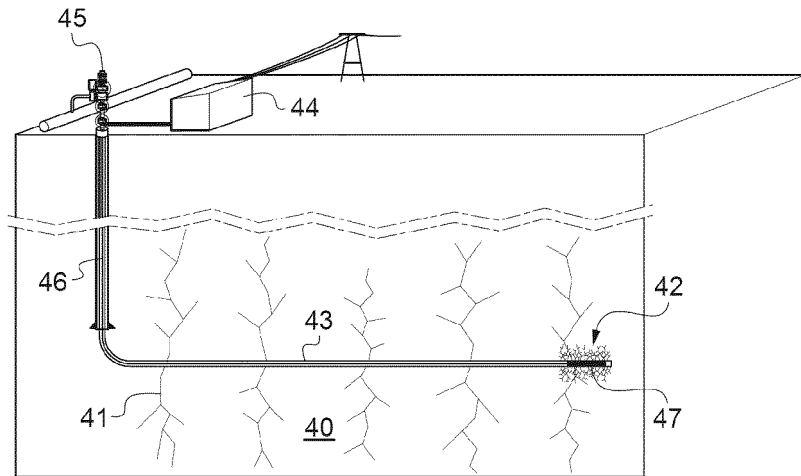


FIG.22

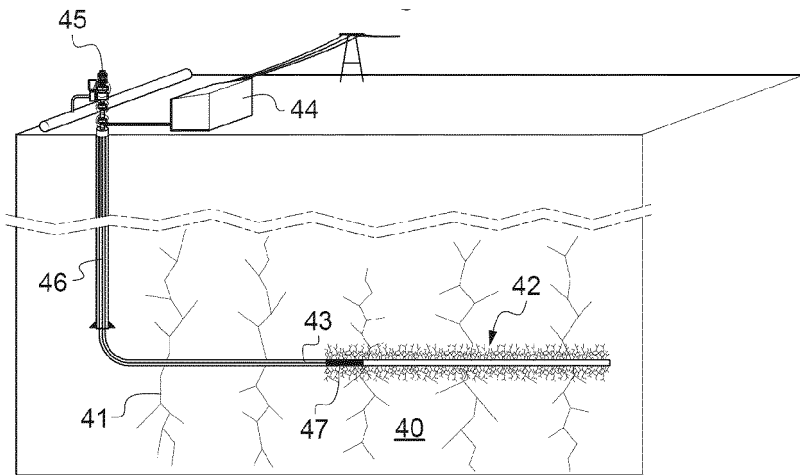
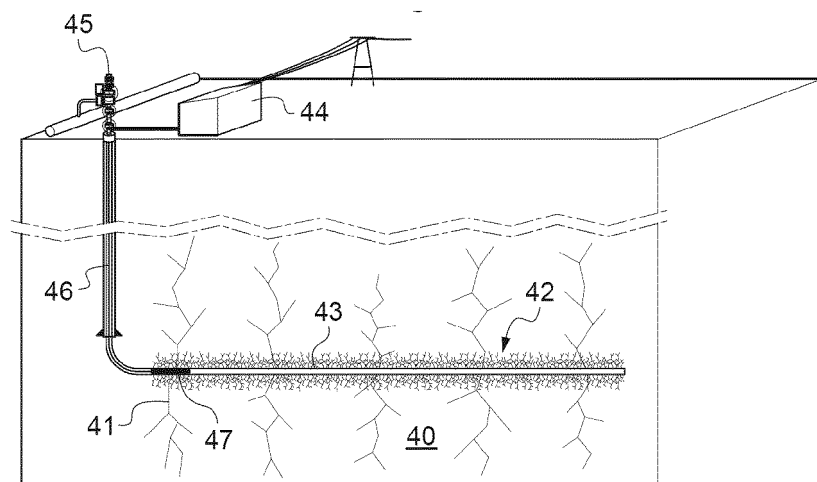


FIG.23



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

- US 2009044945 A1 [0004]
- US 4074758 A [0007]
- US 4164978 A [0007]
- US 5106164 A [0007]
- US 4651311 A [0007]
- US 4706228 A [0007]
- WO 2009073475 A [0007]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **SOEDER, D.J.** Porosity and permeability of Eastern Devonian Shale gas. *SPE Formation Evaluation*, 1988, vol. 3 (1), 116-124 [0002]