



(43) Date de la publication internationale
20 septembre 2012 (20.09.2012)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2012/123461 A2

- (51) Classification internationale des brevets :
E21B 43/26 (2006.01) *E21B 43/00* (2006.01)
E21B 36/04 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2012/054401
- (22) Date de dépôt international :
13 mars 2012 (13.03.2012)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1152063 14 mars 2011 (14.03.2011) FR
- (71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) : **TO-TAL S.A.** [FR/FR]; 2, place Jean Millier, La Défense 6, F-92400 Courbevoie (FR). **UNIVERSITE DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR** [FR/FR]; Avenue de l'Université, BP 576, F-64012 Pau Cedex (FR).
- (71) Déposants (pour US seulement) : **GIBERT, Viviane** (héritière de l'inventeur décédé) [FR/FR]; 200, chemin de Castillou, F-64290 Aubertin (FR). **GIBERT, Géraldine** (héritière de l'inventeur décédé) [FR/FR]; 150, route de Bostens, F-40120 Pouydesseaux (FR). **GIBERT, Vincent** (héritier de l'inventeur décédé) [FR/FR]; 174, route Graba, F-40120 Sarbazan (FR). **GIBERT, Floriane** (héritière de l'inventeur décédé) [FR/FR]; Lieudit Birebent, F-31560 Calmont (FR).
- (72) Inventeur : **GIBERT, Alain** (décédé).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **REY-BETHBEDER, Franck** [FR/FR]; 3, chemin de l'Agle, F-64170 Lacq (FR). **JACQUES, Antoine** [FR/FR]; Avenue des Frères Barthelemy, F-64110 Jurancon (FR). **MARTIN, Justin** [FR/FR]; Appartement n° 1, Résidence Royal Garden, 76 bis, chemin Guilhem, F-64000 Pau (FR). **SYL-VESTRE de FERRON, Antoine** [FR/FR]; 5, Impasse des Pommiers, F-64160 Bernadets (FR). **REESS, Thierry** [FR/FR]; 12, rue du 11 novembre, F-64140 Billère (FR). **MAUREL, Olivier** [FR/FR]; 3, impasse des Myosotis, F-40230 Saint Vincent de Tyrosse (FR). **LABORDERIE, Christian** [FR/FR]; 609, chemin Etxehasia, F-64480 Ustaritz (FR). **PIJAUDIER-CABOT, Gilles** [FR/FR]; 535, rue du Bourg, F-64480 Ustaritz (FR).
- (74) Mandataire : **HIRSCH & ASSOCIES**; 58, avenue Marceau, F-75008 Paris (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : ELECTRICAL AND STATIC FRACTURING OF A RESERVOIR

(54) Titre : FRACTURATION ELECTRIQUE ET STATIQUE D'UN RESERVOIR

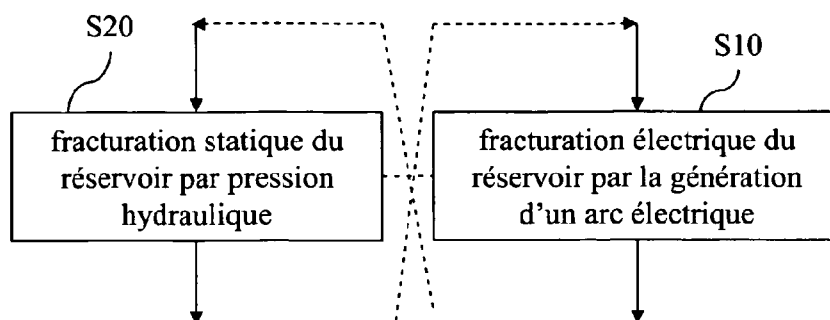


FIG.1

S20 static fracturing of the reservoir by means of hydraulic pressure

S10 electrical fracturing of the reservoir by generating an electric arc

(57) Abstract : The invention relates in particular to a method for fracturing a geological hydrocarbon reservoir, including the static fracturing (S20) of the reservoir by means of hydraulic pressure, and the electrical fracturing (S10) of the reservoir by generating an electric arc in a well drilled into the reservoir. The invention thus enables the improved fracturing of the reservoir.

(57) Abrégé : L'invention se rapporte notamment à un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures comprenant une fracturation statique (S20) du réservoir par pression hydraulique, et une fracturation électrique (S10) du réservoir par génération d'un arc électrique dans un puits foré dans le réservoir. L'invention permet ainsi une fracturation du réservoir améliorée.



WO 2012/123461 A2



SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

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

Publiée :

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

FRACTURATION ELECTRIQUE ET STATIQUE D'UN RESERVOIR

La présente invention concerne un dispositif et un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures, ainsi qu'un procédé de production
5 d'hydrocarbures.

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
10 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.

15 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.

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
20 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
25 procédé de fracturation statique tel que décrit ci-dessus.

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.

30 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.

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 electro-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 ».

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.

Pour cela, il est proposé un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures, dans lequel le procédé comprend une fracturation statique du réservoir par pression hydraulique, et une fracturation électrique du réservoir par génération d'un arc électrique dans un puits foré dans le réservoir.

Suivant des exemples, le procédé peut comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- la fracturation statique précède la fracturation électrique ;
- le puits est horizontal ;
- la fracturation électrique est répétée en différentes zones de traitement le long du puits ;

- en chaque zone de traitement, plusieurs arcs sont générés à la suite, de préférence, lesdits arcs induisent une onde de pression dont le temps de montée un temps de montée est décroissant ;
- en chaque zone de traitement, les arcs sont générés à une fréquence égale à la
5 fréquence de résonance d'un matériau à fracturer dans le réservoir ;
- les arcs sont 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 ;
- le réservoir a une perméabilité inférieure à 10 microdarcy ;
- 10 - le réservoir est un réservoir de gaz de schiste.
- la fracturation électrique est générée par un dispositif de fracturation qui comprend deux garnitures d'étanchéité définissant entre elles un espace confiné dans un puits foré dans le réservoir ; une pompe d'augmentation de la pression d'un fluide dans l'espace confiné ; un appareil de chauffage du
15 fluide ; au moins 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 comprenant au moins une source de tension reliée aux électrodes et une inductance entre la source de tension et l'une des deux électrodes ;
- 20 - l'inductance est une bobine d'inductance réglable, de préférence comprise entre 1 μ H et 100 mH, encore de préférence comprise entre 10 μ H et 1 mH ;
- une distance entre les 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 réglable ;
- 25 - la source de tension comprend un générateur de Marx.

Il est également proposé un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures préalablement fracturé statiquement par pression hydraulique, dans lequel le procédé comprend une fracturation électrique du réservoir tel que celle décrite ci-dessus.

- 30 Il est également proposé un procédé de production d'hydrocarbures comprenant la fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures suivant le procédé décrit ci-dessus.

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 :

- 5 - figures 1 à 3, des schémas représentant des procédés de fracturation proposés ;
- figures 4 à 6, un exemple de la fracturation électrique du procédé de fracturation de l'une quelconque des figures 1 à 3 ;
- figures 7 à 10, des exemples d'un dispositif particulier de génération d'un arc électrique;
- 10 - figures 11 à 16, des exemples de mesures.

En référence à la figure 1, il est proposé un procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures. Le procédé de la figure 1 comprend une fracturation statique (S20) du réservoir par pression hydraulique. Et le procédé de la figure 1 comprend également, avant, pendant ou après la fracturation statique (S20)
15 (ces trois possibilités étant représentées par les pointillés sur la figure 1), une fracturation électrique (S10) du réservoir par génération d'un arc électrique dans un puits foré dans le réservoir. Le procédé de la figure 1 améliore la fracturation du réservoir.

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.
20 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 microfissures dans toutes
25 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 (S10) ne nécessite pas d'énergies considérables ni de quantités
30 d'eau trop importantes. Il n'y a donc pas besoin de système de recyclage de l'eau particulier.

On peut ainsi accéder à de l'hydrocarbure présent dans le réservoir difficilement disponible par fracturation statique. La combinaison de la fracturation

statique (S20) et de la fracturation électrique (S10) permet donc une meilleure fracturation globale du réservoir.

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
5 avec moins d'atténuations. Le puits foré contient du fluide qui est typiquement de l'eau. En d'autres termes, lorsque la fracturation électrique (S10) 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.

10 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 unidirectionnelles, typiquement plus profondes que celles créées
15 par la fracturation électrique (S10).

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.

20 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-
25 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
30 et 5000 mètres.

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.

5 En référence à la figure 2, 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 2 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 2 permet
10 l'endommagement de réservoirs déjà exploités après fracturation statique. En d'autres termes, le procédé de la figure 2 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 2 correspond au procédé de la figure 1 (où la fracturation statique (S20)
15 correspond à cette fracturation statique préalable). Ainsi, la fracturation statique préalable peut avoir été effectuée selon le procédé de la figure 1.

 En référence à la figure 3, 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 3
20 peut bien entendu être utilisée dans le procédé de la figure 1 et/ou dans le procédé de la figure 2. Le procédé de la figure 3 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
25 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 la figure 3 améliore la fracturation du réservoir.

 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
30 (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.

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.

Différentes possibilités applicables à l'un quelconque des procédés de la figure 1, de la figure 2 ou de la figure 3 vont maintenant être décrites.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

Un exemple de la fracturation électrique (S10) du procédé de fracturation de l'une quelconque des figures 1 à 3 va maintenant être décrit en référence aux figures

4 à 6. 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.

5 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.

Dans l'exemple des figures 4 à 6, la fracturation électrique (S10) induit des fractures secondaires 42 au niveau de l'endroit où l'arc est généré. Dans l'exemple, 10 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 4 montre en effet une phase initiale de la fracturation électrique (S10) en fond de puits. La figure 5 montre une phase intermédiaire en milieu de puits. Et la figure 6 montre une phase finale en 15 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 20 statique.

De manière générale, l'arc électrique du procédé de l'une quelconque des figures 1 à 3 ou 4 à 6 peut être généré par tout dispositif prévu pour la génération d'un tel arc. Cependant, un dispositif particulier permettant la génération de l'arc va maintenant être décrit. Il est bien entendu que les différentes fonctionnalités du 25 dispositif particulier (i.e. les différentes actions qu'il permet d'accomplir) peuvent être intégrées au procédé de l'une quelconque des figures 1 à 3, notamment à la fracturation électrique S10 du procédé.

Le dispositif particulier de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures comprend deux garnitures d'étanchéité définissant entre elles un 30 espace confiné dans un puits foré dans le réservoir (i.e. prévu pour être confiné au moins lorsque le dispositif particulier est installé dans un puits foré dans le réservoir), et un circuit électrique (configuré/adapté/prévu) pour la génération d'un arc électrique entre deux électrodes agencées dans l'espace confiné. Le circuit

comprend au moins une source de tension reliée aux électrodes et une inductance entre la source de tension et l'une des deux électrodes. Le dispositif comprend également une pompe d'augmentation de la pression d'un fluide dans l'espace confiné et un appareil de chauffage du fluide. Le dispositif particulier améliore la
5 fracturation du réservoir.

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 est alors préférentiellement en un matériau
10 adapté à une bonne conduction des ondes de pression, ce qui optimise la fracturation électrique (S10). Par « confiné », on entend que l'espace confiné est prévu pour que la pression et la température y régnant puisse être modifiée grâce à la pompe et à l'appareil de chauffage, tel que connu de l'homme de l'art. Cela permet d'optimiser le fluide présent dans l'espace confiné pour favoriser l'apparition d'un arc électrique
15 entre les deux électrodes, en fonction des conditions du réservoir ou de la nature du fluide. Par exemple, l'augmentation de la température à pression constante facilite généralement l'apparition d'un arc électrique. Ainsi, le « confinement » peut mais ne signifie pas nécessairement une fermeture totale, et de même, l'étanchéité peut mais n'est pas nécessairement totale.

20 Le circuit comprend au moins une inductance entre la source de tension et l'électrode à laquelle elle est reliée. L'inductance peut être tout composant qui induit un retard temporel du courant par rapport à la tension. La valeur d'une inductance s'exprime en Henry. L'inductance peut ainsi être une bobine, éventuellement enroulée autour d'un noyau en matériau ferromagnétique, ou des ferrites.
25 L'inductance est également connue sous les noms de « self », « solénoïde » lorsqu'il s'agit d'une bobine, 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
30 peut être supérieure à 1 μ H ou à 10 μ H, et/ou inférieure à 100 mH ou à 1 mH.

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. Cela permet au dispositif d'être adapté notamment

au procédé de fracturation des figures 4 à 6, avec les avantages qui en découlent. 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. (En effet, dans l'exemple des figures 4 à 6, la mobilité du dispositif de fracturation 47, qui peut
5 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.) 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
10 et/ou le train de tige.

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
15 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.

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
20 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 de façon à créer un gradient thermique entre les
25 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.

D'autres caractéristiques potentielles du dispositif particulier de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures vont maintenant être présentées en
30 référence aux figures 7 à 10 qui montrent un dispositif 100 constituant un exemple du dispositif particulier de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures présenté ci-dessus.

Le dispositif 100 de la figure 7 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
5 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.

10 Dans la figure 7, la pompe d'augmentation de la pression d'un fluide dans l'espace confiné et l'appareil de chauffage du fluide ne sont pas représentés. 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 représentés non plus, mais peuvent être conformément aux figures 8 à 10 qui présentent de manière schématique des
15 exemples du dispositif 100.

Le dispositif 100 de la figure 8 comprend la bobine d'inductance 110. La source de tension comprend le condensateur 112. Comme on le voit sur le schéma de la figure 8, lorsque le condensateur 112 se décharge, un arc électrique peut apparaître entre les électrodes 106. Le condensateur 112 peut présenter une capacité supérieure
20 à 1 μF , de préférence supérieure à 10 μF . Une telle capacité permet d'atteindre une énergie entraînant l'apparition d'un arc subsonique.

Un arc électrique est dit « subsonique » ou « supersonique » suivant sa vitesse. Un arc « subsonique » est typiquement associé à des processus thermiques : l'arc se propage à travers des bulles de gaz créées par l'échauffement de l'eau. On parle de
25 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,
30 l'onde de pression se propage dans un volume de gaz important avant de se propager dans le fluide. Un arc « supersonique » est typiquement associé 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
5 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.

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

10 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 tel que décrite précédemment.

15 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.

Le dispositif 100 de la figure 9 est différent de l'exemple de la figure 8 en ce
20 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.

Dans le dispositif 100 de la figure 10, la source de tension comprend le
25 condensateur 112 de la figure 8 et le générateur de Marx 118 de la figure 9. 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
30 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.

Dans les trois exemples des figures 8 à 10, 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.

Les explications fournies ci-dessus vont maintenant être illustrées par des développements théoriques et des essais décrits en référence aux figures 11 à 16 et relatifs notamment au dispositif 100 des figures 8 à 10.

En référence à la figure 11 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.

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.

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

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

$$i(t) = \frac{U_B}{Lw} \cdot \exp \frac{Rt}{2L} \cdot \sin(wt) \quad (1)$$

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

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.

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.

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 12 et 13, 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.

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 14.

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 15. 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.

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.

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 16. 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.

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.

Mise en équation des principes évoqués ci-dessus :

Calcul du courant de crête noté $i_{\max}$

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

$$\begin{aligned} \text{si } \sin(wt) &= 1 \text{ et } wt = \frac{\pi}{2} \\ \text{alors } i(t) &= i_{\max} \exp^{-\frac{\pi}{2w}} \end{aligned}$$

En utilisant les équations (1) et (2) :

$$i_{\max} = \frac{U_b}{Lw} \cdot \exp^{-\frac{R\pi}{4Lw}} \quad (3)$$

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

Dans le cas où on approxime la valeur de w (valeur de R très faible) :

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

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

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

5 *Relation de l'énergie*

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

Avec E_b l'énergie et U_b la tension au moment de l'arc électrique.

En remplaçant l'équation (8) dans (3) :

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

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 .

15 *Relation entre la pression crête et le courant maximal*

D'après les résultats exposés aux figures 12, 13 et 15, on peut déduire l'expression suivante :

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

avec k_1 fonction de la distance inter-électrodes et du mode claquage

20 Plus la distance inter-électrodes est grande plus le coefficient k_1 est grand

D'où :

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

En remplaçant l'équation (11) dans (9) :

25

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

$$P_{max} = k_1 \sqrt{\frac{2E_b}{L}} \cdot \exp^{-\frac{R\pi}{4} \sqrt{\frac{C}{L}}} \quad (14)$$

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
5 pression désirée.

Relation entre le dP_{max}/dt_p en fonction du di_{max}/dt_i

D'après la figure 16, on peut déduire l'expression suivante :

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

avec k_2 fonction de la distance inter-électrodes et du mode claquage

10 Le coefficient k_2 correspond au couplage physique électro-acoustique.

En utilisant l'équation (11) et (15) :

$$\frac{k_1 di_{max}}{dt_p} = k_2 \frac{di_{max}}{dt_i} \quad (16)$$

$$dt_p = \frac{k_2}{k_1} dt_i \quad (17)$$

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

15 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).

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
20 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
25 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.

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.

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.

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. Procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures, dans lequel le procédé comprend :
 - 5 - une fracturation statique (S20) du réservoir par pression hydraulique, et
 - une fracturation électrique (S10) du réservoir par génération d'un arc électrique dans un puits foré dans le réservoir.
2. Procédé selon la revendication précédente dans lequel la fracturation statique
10 (S20) précède la fracturation électrique (S10).
3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le puits (43) est horizontal.
- 15 4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la fracturation électrique (S10) est répétée en différentes zones de traitement le long du puits (43).
5. Procédé selon la revendication précédente, dans lequel en chaque zone de traitement, plusieurs arcs sont générés à la suite, de préférence, lesdits arcs induisent
20 une onde de pression dont le temps de montée un temps de montée est décroissant.
6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel en chaque zone de traitement, les arcs sont générés à une fréquence égale à la fréquence de résonance d'un matériau à fracturer dans le réservoir.
25
7. Procédé selon la revendication précédente, dans lequel les arcs sont 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.
- 30 8. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le réservoir (40) a une perméabilité inférieure à 10 microdarcy.

9. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le réservoir (40) est un réservoir de gaz de schiste.
10. Procédé de fracturation d'un réservoir géologique d'hydrocarbures
5 préalablement fracturé statiquement par pression hydraulique, dans lequel le procédé comprend une fracturation électrique (S10) du réservoir selon l'une des revendications précédentes.
11. Procédé de fracturation selon l'une des revendications précédentes, dans lequel
10 la fracturation électrique (S10) est générée par un dispositif (100) de fracturation qui comprend :
- deux garnitures d'étanchéité (102, 103) définissant entre elles un espace confiné (104) dans un puits foré dans le réservoir ;
 - une pompe d'augmentation de la pression d'un fluide dans l'espace confiné ;
 - 15 - un appareil de chauffage du fluide ;
 - au moins une paire de deux électrodes (106) agencées dans l'espace confiné (104) ; et
 - un circuit électrique pour la génération d'un arc électrique entre les deux électrodes (106), le circuit comprenant au moins une source de tension (112,
20 118) reliée aux électrodes (106) et une inductance (110) entre la source de tension et l'une des deux électrodes.
12. Procédé selon la revendication précédente, dans lequel l'inductance est une bobine (110) d'inductance réglable, de préférence comprise entre 1 μ H et 100 mH,
25 encore de préférence comprise entre 10 μ H et 1 mH.
13. Procédé selon la revendication 11 ou 12, dans lequel une distance entre les électrodes est réglable, de préférence comprise entre 0,2 et 5 cm, encore de préférence comprise entre 1 et 3 cm.
30
14. Procédé selon l'une des revendications 11-13, dans lequel la source de tension comprend un condensateur (112) de capacité réglable.

15. Procédé selon l'une des revendications 11-14, dans lequel la source de tension comprend un générateur de Marx (118).
16. Procédé de production d'hydrocarbures comprenant la fracturation d'un
- 5 réservoir géologique d'hydrocarbures suivant le procédé de l'une des revendications 1-15.

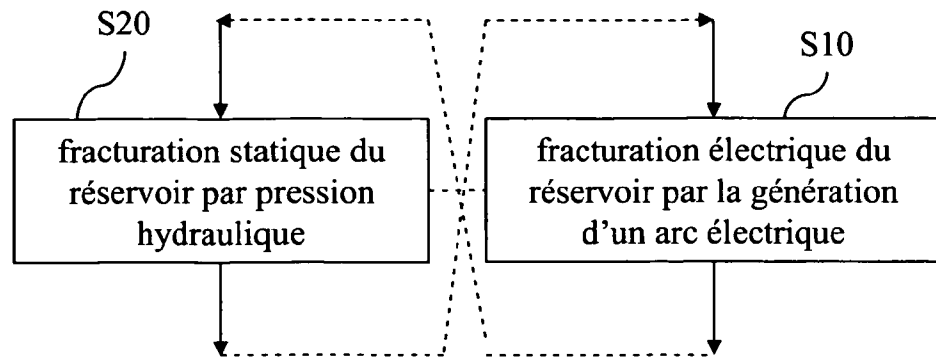
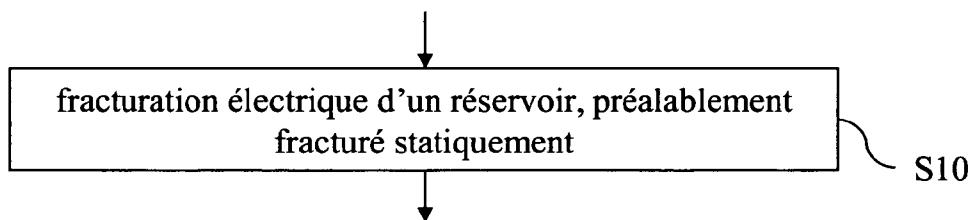
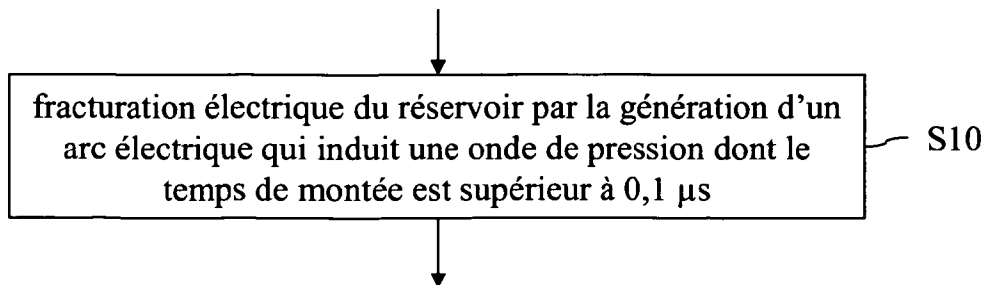
FIG.1FIG.2FIG.3

Fig.4

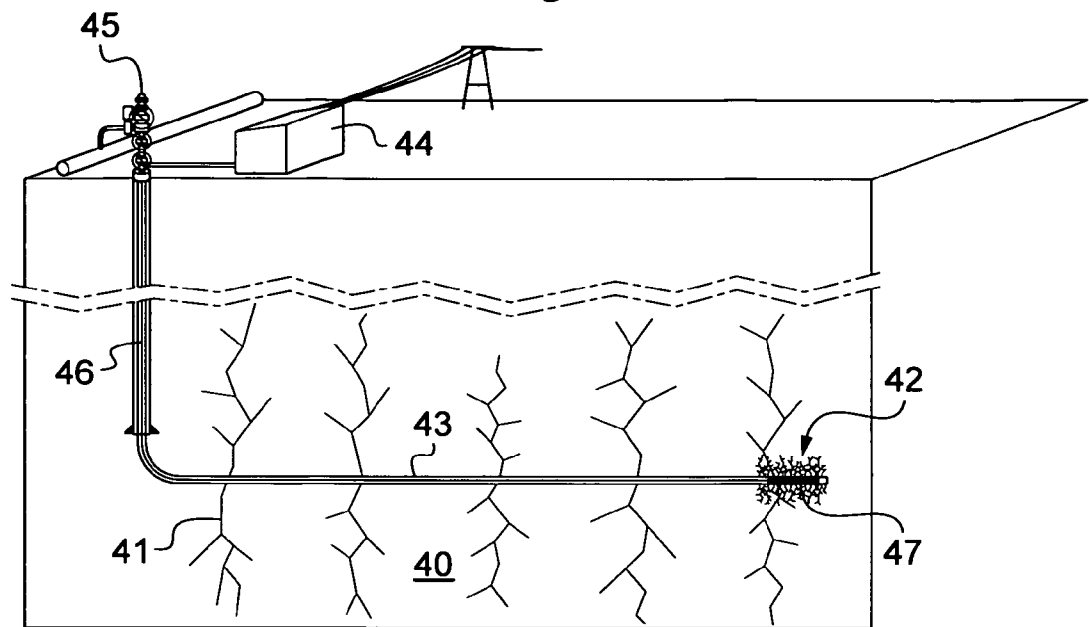


Fig.5

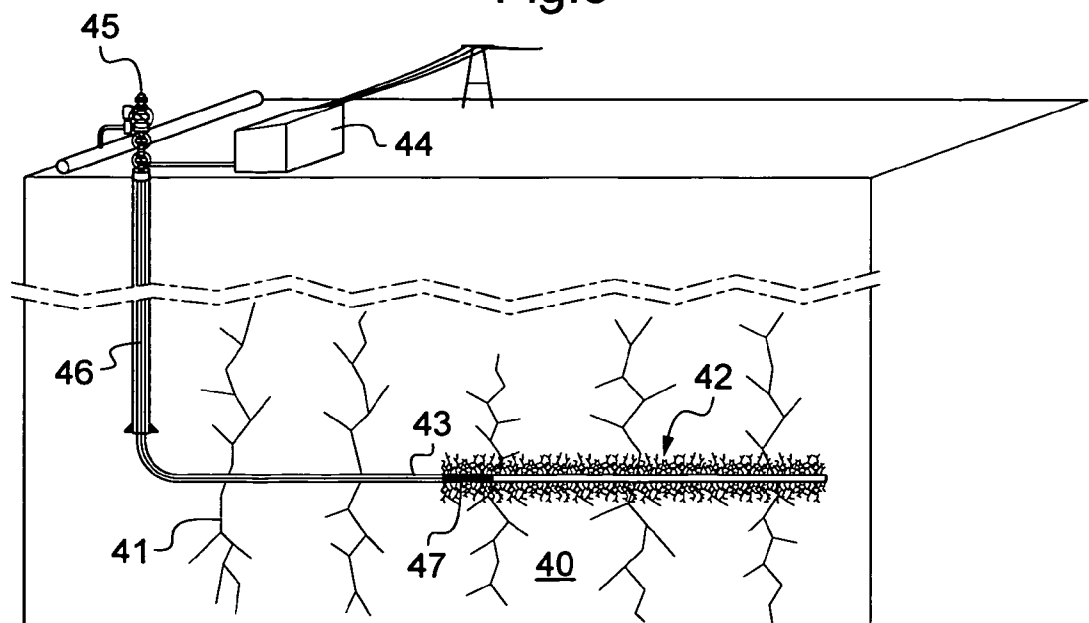


Fig.6

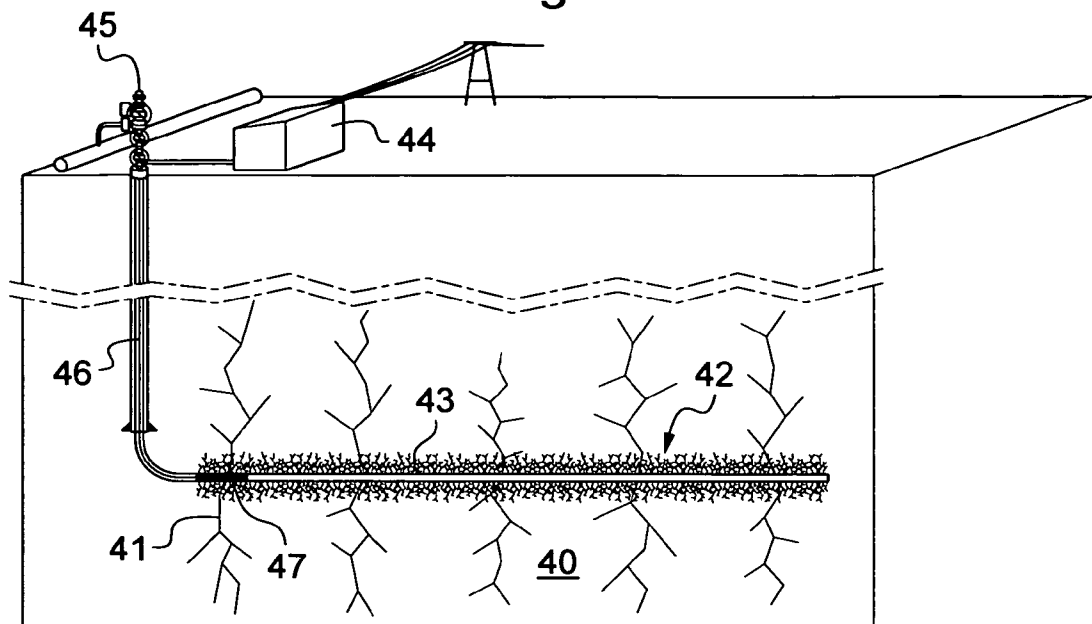
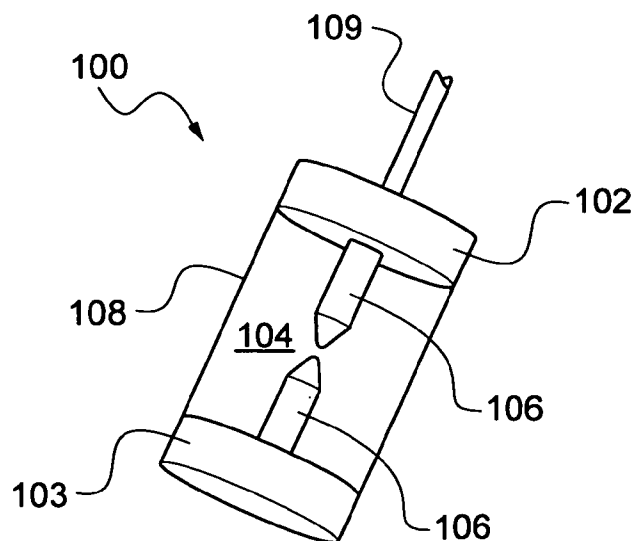


Fig.7



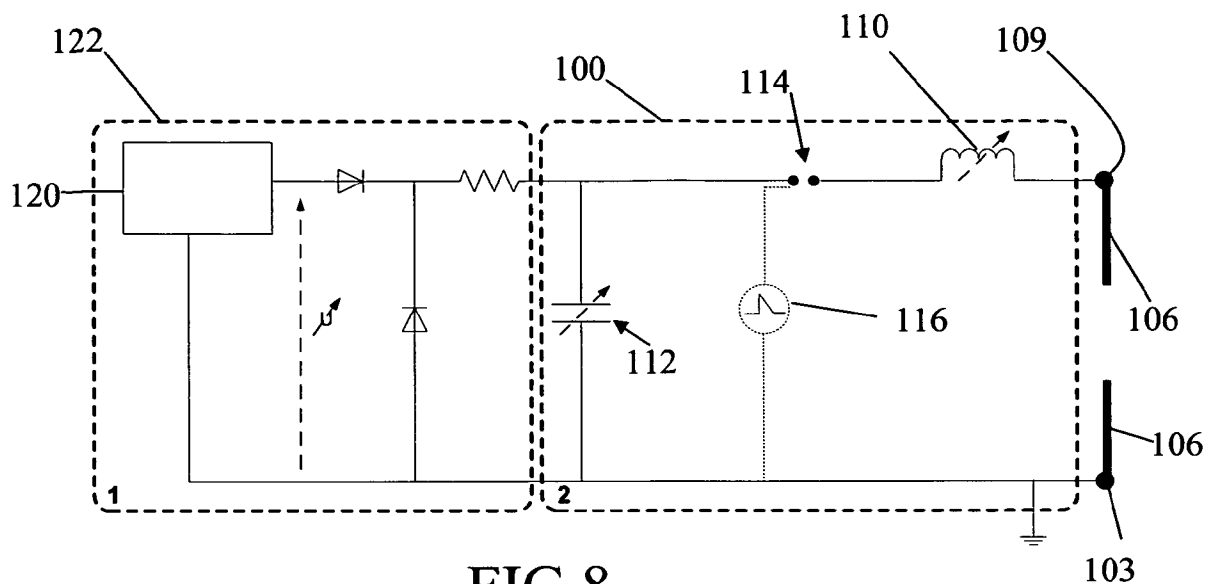


FIG.8

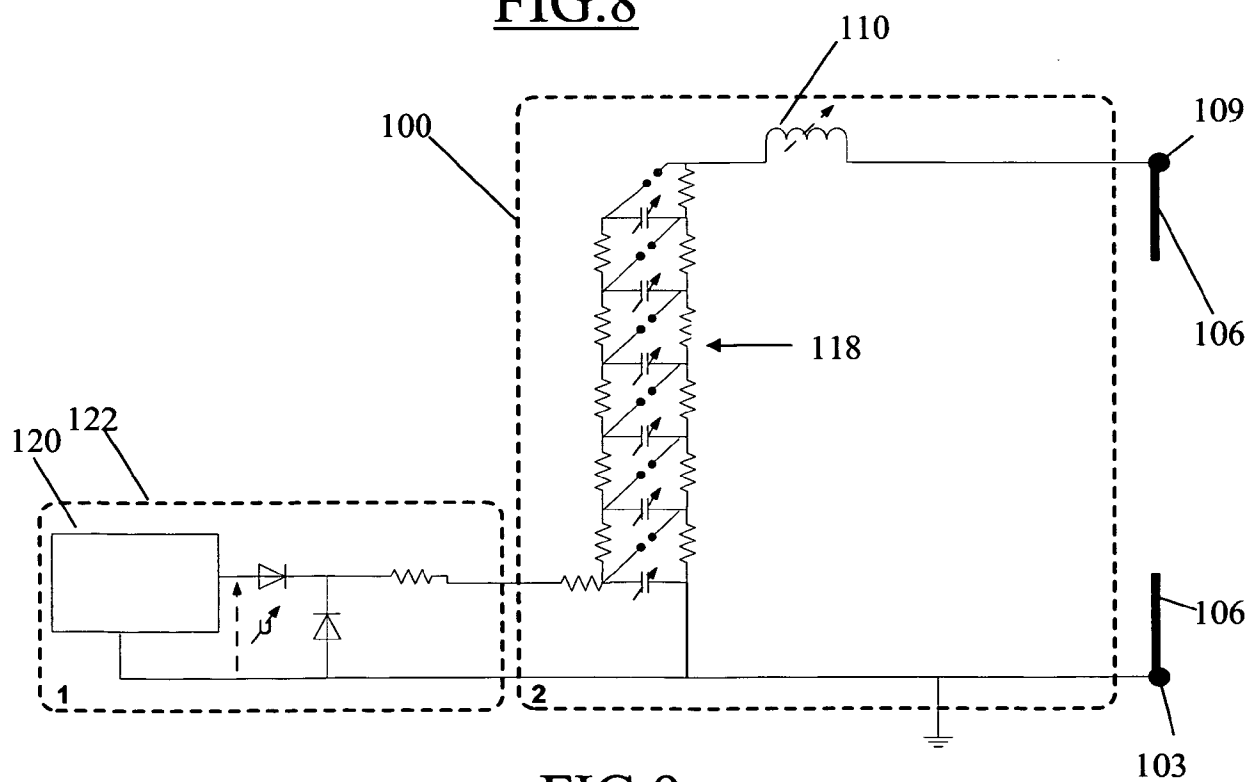
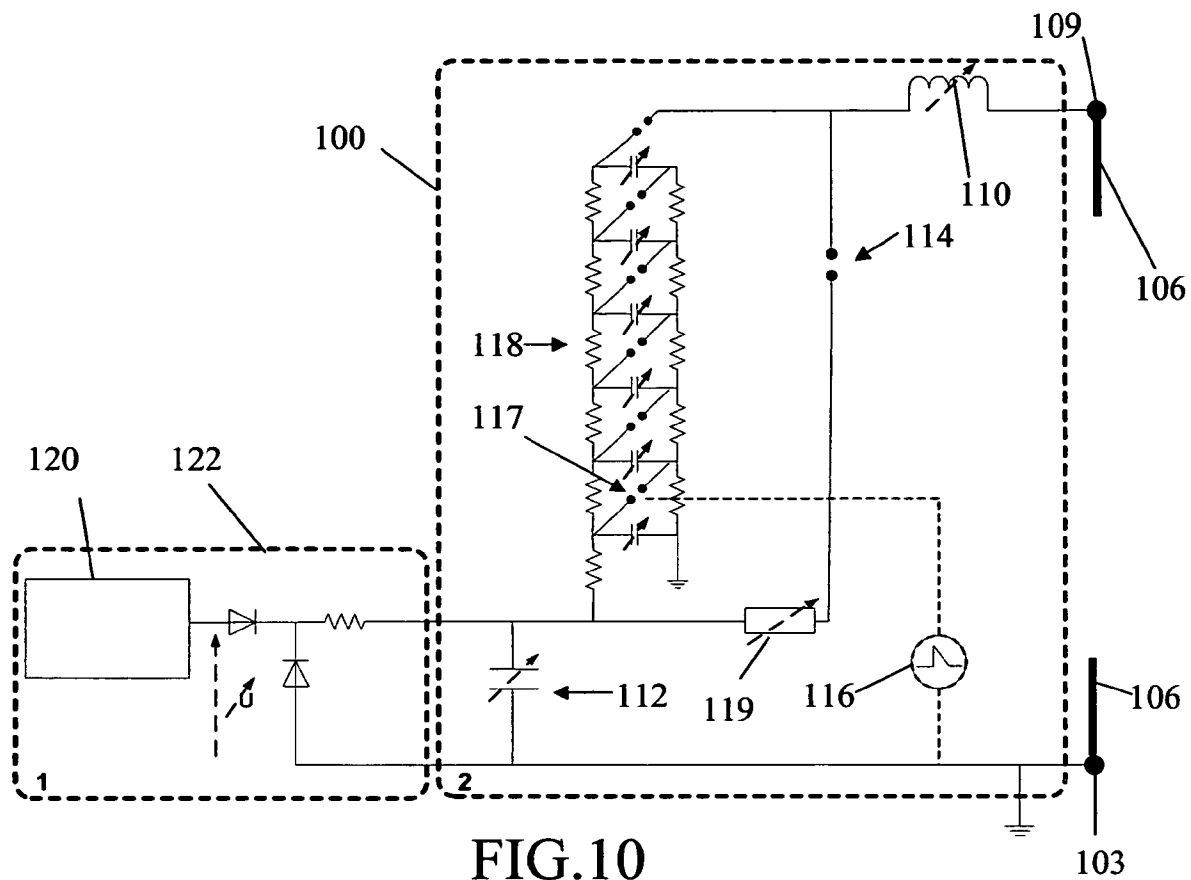
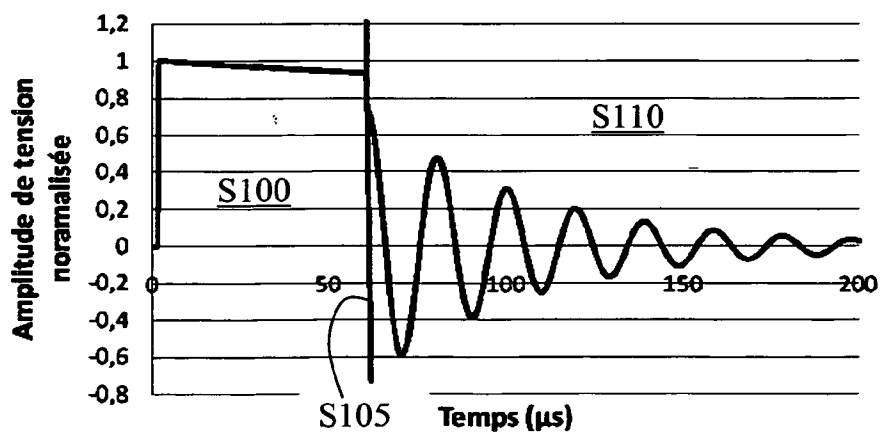


FIG.9

**FIG.10****FIG.11**

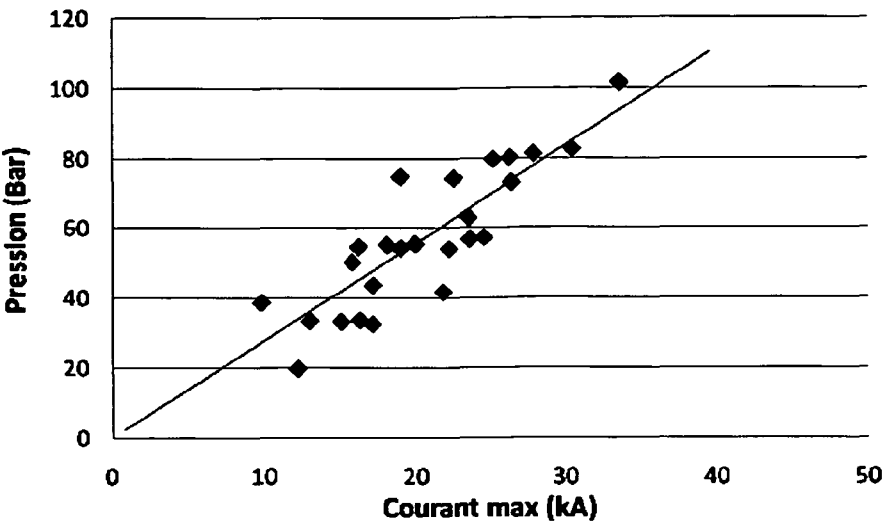


FIG.12

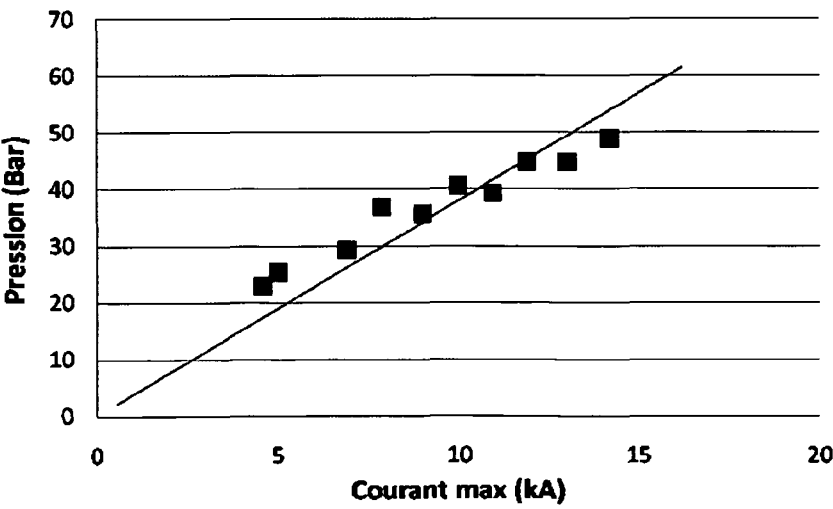


FIG.13

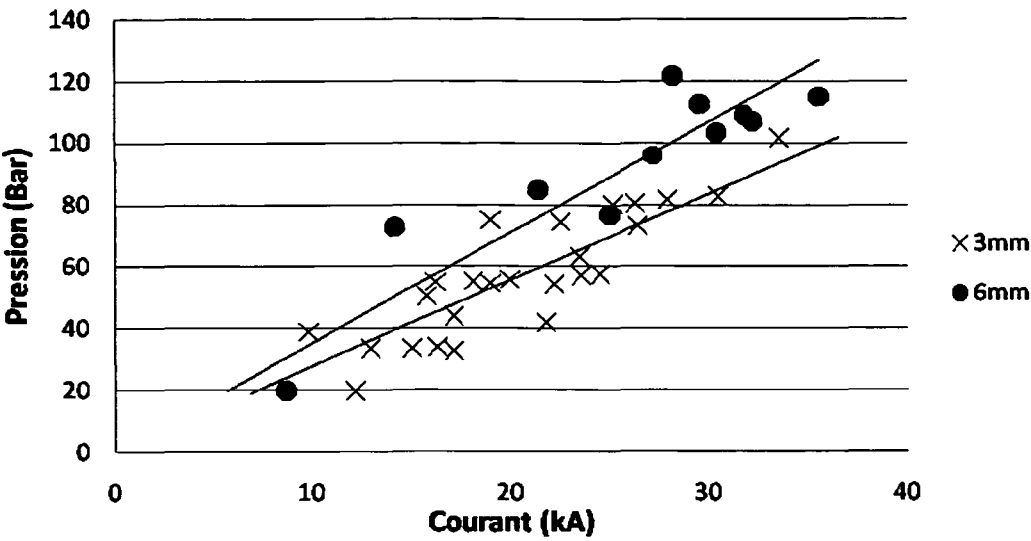


FIG.14

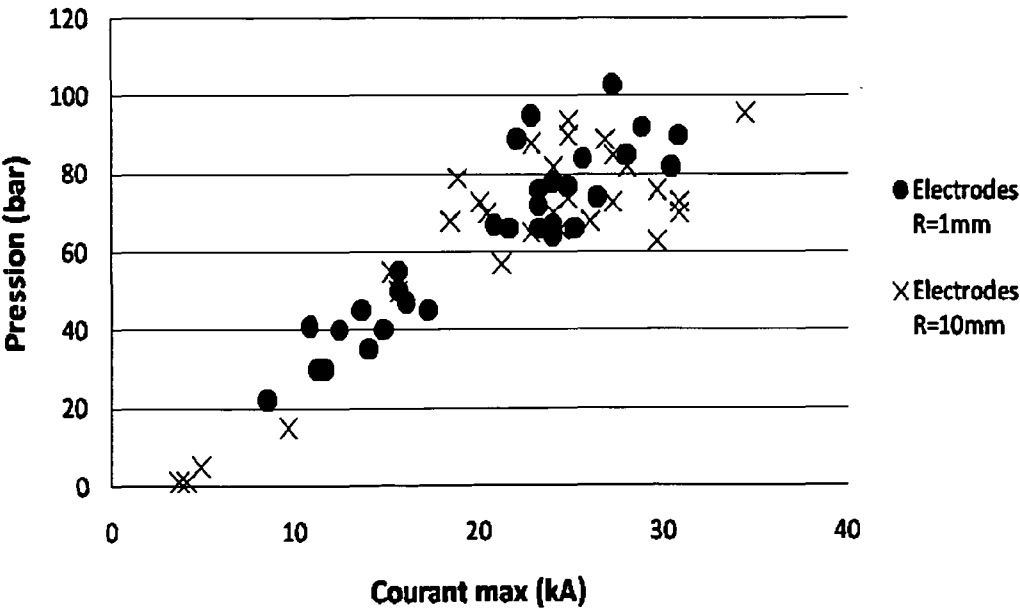
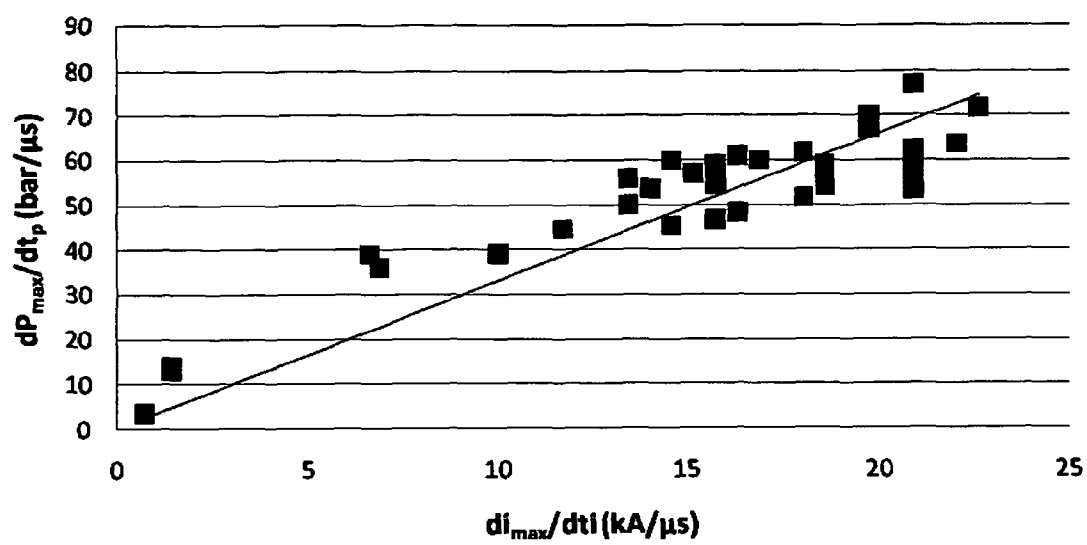


FIG.15

FIG.16