



(43) Date de la publication internationale
5 octobre 2017 (05.10.2017)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2017/167567 A1

(51) Classification internationale des brevets :
G01N 27/02 (2006.01) G01N 33/28 (2006.01)
G01V 3/26 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2017/055695

(22) Date de dépôt international :
10 mars 2017 (10.03.2017)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1652871 1 avril 2016 (01.04.2016) FR

(71) Déposant : IFP ENERGIES NOUVELLES [FR/FR]; 1
& 4 avenue du Bois-Préau, 92852 RUEIL-MALMAISON
(FR).

(72) Inventeurs : CEREPI, Adrian; 3, rue de la prairie, 33600
Pessac (FR). DESCHAMPS, Hervé; 0002 ALL RENE
RAMBAUD, 78590 NOISY LE ROI (FR). GARCIA,
Bruno; 0004 PL DES MAITRES VIGNERONS, 92500
RUEIL MALMAISON (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, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN,
KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA,
MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG,
NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS,
RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY,
TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN,
ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU,
TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU,
LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,
SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(54) Title : DEVICE FOR DETERMINING PETROPHYSICAL PARAMETERS OF AN UNDERGROUND FORMATION

(54) Titre : DISPOSITIF POUR LA DETERMINATION DE PARAMETRES PETROPHYSIQUES D'UNE FORMATION SOU-
TERRAINE

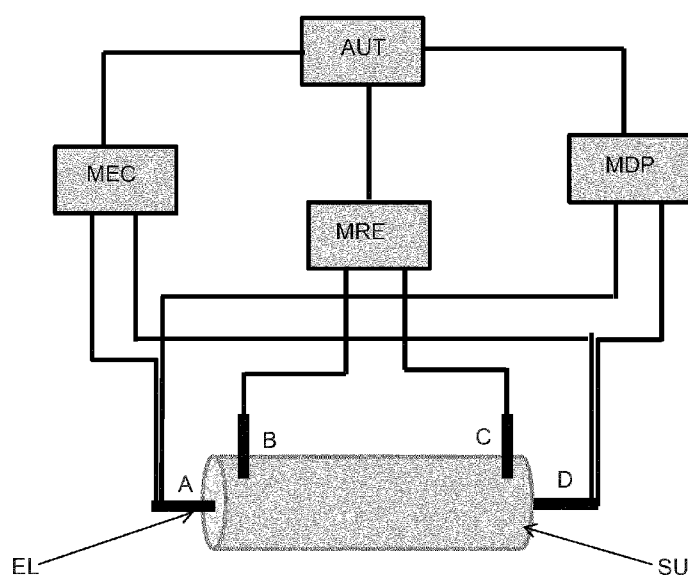


Fig. 2

(57) Abstract : The invention relates to a device for determining petrophysical parameters of an underground formation, comprising at least two electrodes (EL), a means for emitting a frequency-variable electric current (MEC), and a means for measuring electrical resistivity (MRE) in terms of amplitude and phase, two of the electrodes (EL) cooperating with the emission means (MEC) and at least two of the electrodes (EL) cooperating with the means for measuring resistivity (MRE), a means for measuring a difference in electrical potential (MDP) cooperating with at least two of the electrodes (EL). The invention is particularly applicable to oil exploration and development.

(57) Abrégé : L'invention concerne un dispositif pour la détermination de paramètres pétrophysiques d'une formation souterraine, comprenant au moins deux électrodes (EL), un moyen d'émission d'un courant électrique variable en fréquences (MEC) et un moyen de mesure de la résistivité électrique (MRE) en amplitude et en phase, deux des électrodes (EL) coopérant avec le moyen d'émission (MEC) et au moins deux des électrodes (EL) coopérant avec le

[Suite sur la page suivante]



DISPOSITIF POUR LA DETERMINATION DE PARAMETRES PETROPHYSIQUES D'UNE FORMATION SOUTERRAINE

La présente invention concerne le domaine de l'exploration et de l'exploitation d'un fluide contenu dans une formation souterraine.

Notamment, la présente invention peut concerner l'exploration et l'exploitation de
5 réservoirs pétroliers, ou de sites géologiques de stockage de gaz, tel que le dioxyde de carbone (noté CO₂ par la suite) ou le méthane.

L'exploration et l'exploitation de gisements pétroliers nécessitent d'acquérir une
connaissance aussi précise que possible de la géologie souterraine, et ce, afin de fournir de
10 façon efficace une évaluation des réserves, une modélisation de la production, ou de la gestion de l'exploitation. Par exemple, la détermination de l'emplacement d'un puits de production ou d'un puits d'injection au sein d'un gisement d'hydrocarbures, la constitution de la boue de forage, les caractéristiques de complétion, le choix d'un procédé de récupération des hydrocarbures (tel que l'injection d'eau par exemple) et des paramètres nécessaires à la mise
15 en œuvre de ce procédé (tels que la pression d'injection, le débit de production etc.) nécessitent de bien connaître le gisement. Par bonne connaissance d'un gisement, on entend une description aussi précise que possible de la structure du gisement étudié, de ses propriétés pétrophysiques, ou encore des propriétés des fluides présents dans le gisement étudié.

Pour acquérir cette connaissance, l'industrie pétrolière allie les mesures réalisées in situ
20 (lors de campagnes sismiques, de mesures dans des puits, de carottages etc), les mesures réalisées en laboratoire (étude de lames minces, mesures de perméabilité etc), ainsi que les simulations numériques (réalisées au moyen de logiciels, visant à reproduire aussi précisément que possible les phénomènes physiques et/ou chimiques se produisant in situ ou à l'échelle du laboratoire). Cette connaissance est généralement formalisée sous la forme d'un maillage,
25 connu sous le terme de « modèle géologique », chaque maille comprenant un ou plusieurs paramètres pétrophysiques (tels que porosité, perméabilité, lithologie). Afin de reproduire ou prédire (i.e. "simuler") la production d'hydrocarbures réelle, le spécialiste en ingénierie de réservoir met en œuvre un logiciel de calcul, appelé « simulateur de réservoir ». Le simulateur de réservoir est un simulateur d'écoulement, qui calcule les écoulements et l'évolution des
30 pressions au sein du réservoir représenté par un « modèle de réservoir ». Les résultats de ces calculs permettent notamment de prévoir et d'optimiser des schémas d'exploitation (définition

du nombre de puits à implanter, de leur position, du mode de récupération assistée, etc.) du gisement étudié afin d'améliorer les débits et/ou les quantités d'hydrocarbures récupérés.

Ainsi, l'exploitation du fluide présent dans une formation souterraine nécessite notamment une bonne connaissance de la formation souterraine dans laquelle est piégé le fluide d'intérêt.

- 5 La présente invention vise à la détermination de paramètres pétrophysiques relatifs à la formation souterraine étudiée, à un stade donné de son exploitation ou tout au long de son exploitation, et ce à partir de mesures de type électrique, réalisées préférentiellement à différentes échelles (à l'échelle du laboratoire et à l'échelle du puits).

10 **Etat de la technique**

Les documents suivants seront cités dans la suite de la description :

- Binley, A., Later D.L., Fukes, M., Cassiani, G.I., 2005. Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone, *Water Resources Research*, vol. 41, W12417, 2005.
- 15 Chilingar, G.V., Haroun, M., 2014. *Electrokinetics for Petroleum and Environmental Engineers*, book, ed. Wiley, ISBN: 978-1-118-84269-0, 264 pages, January 2015.
- Cuevas, N., Rector, J.W., Moore, J.R., Glaser, S.D., 2009. Electrokinetic Coupling in Hydraulic Fracture Propagation, SEG International Exposition and Annual Meeting, 2009, p 1721-1725.
- Daily, W., Ramirez, A., Binley, A., 2004, Remote Monitoring of Leaks in Storage Tanks using
20 Electrical Resistance Tomography: Application at the Hanford Site, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, March-April 2004, Vol. 9, No. 1 : pp. 11-24.
- Olhoeft, G.R. (1985), Low-frequency electrical properties ; *Geophysics*, v. 50, no. 12, pp. 2492-2503.
- Onizawa, S., Matsushima, N., Ishido, T., Hase, H., Takakura, S., Nish., Y., 2009. Self-potential
25 distribution on active volcano controlled by three-dimensional resistivity structure in Izu-Oshima, Japan, *Geophys. J. Int.* (2009) 178, 1164–1181.
- Saunders, J., Jackson, M., and Pain, C., 2008. Fluid flow monitoring in oil fields using downhole measurements of electrokinetic potential, *Geophysics*, vol. 73, no. 5 september - october 2008, 10.1190/1.2959139.
- 30 Scott, J.B.D. and Barker, R.D., 2003. Determining pore-throat size in Permo-Triassic sandstones from low-frequency electrical spectroscopy, *Geophysical Research Letters*, Volume 30, Issue 9, May 2003.

Les mesures électriques de matériaux issus d'une formation souterraine sont de façon générale bien connues dans le domaine des géosciences. Parmi ces mesures, figurent les mesures de Potentiel Spontané et les mesures de Polarisation Spectrale Induite.

5 Les mesures de Potentiel Spontané (noté PS par la suite) sont utilisées dans le but d'améliorer la vision de la structure des objets se trouvant en proche surface (de quelques centaines de mètres à quelques milliers de mètres de profondeur) ou encore la connaissance des volumes de fluides présents au sein d'une formation souterraine et la circulation de ces fluides. Par exemple, dans le domaine de la volcanologie, la mesure de PS est utilisée dans le
10 but de mettre en évidence la présence d'une remontée de fluides chauds chargés électriquement, induisant un signal électrique par électrofiltration, et produisant une anomalie négative de PS.

Dans le domaine pétrolier, on connaît l'utilisation des mesures de PS dans le cadre du stockage de gaz (de type gaz naturel et/ou CO₂), ou de la production d'hydrocarbures
15 conventionnels et non conventionnels, en production primaire (détermination de la saturation eau/huile/gaz), secondaire (impact de l'injection d'eau de mer par exemple) ou encore tertiaire (récupération assistée, ou Enhanced Oil Recovery (EOR) en anglais, par injection de produits chimiques tels des polymères/surfactants). Par exemple, dans le domaine de la production pétrolière, on connaît le document (Saunders et al., 2008), qui modélise le comportement du
20 signal PS dans un forage lors d'un pompage d'hydrocarbures dans un réservoir pétrolier. Ces auteurs mettent notamment en évidence la pertinence des mesures de PS pour un suivi de la propagation de l'interface eau/hydrocarbure avec de l'eau injectée lors du pompage. Toujours dans le domaine de la production d'hydrocarbures, on connaît par le document (Chilingar and Haroun, 2014) l'utilisation des techniques d'injection de courant électrocinétique pour améliorer
25 le processus de récupération assistée dans les réservoirs par injection de CO₂.

On connaît également par le document (Cuevas et al., 2009) l'utilisation du coefficient de couplage électrocinétique en géomécanique, notamment pour le suivi des procédés de fracturation hydraulique. En effet, dans le domaine pétrolier, la technique de la fracturation de la roche réservoir sous l'effet de la haute pression hydraulique exercée sur la roche est largement
30 utilisée pour améliorer les propriétés d'un réservoir (notamment sa perméabilité), permettant ainsi d'améliorer la récupération du pétrole dans le réservoir. Cette fracturation hydraulique est accompagnée par des ouvertures progressives de fractures et provoque une augmentation de la densité du champ électrocinétique et du potentiel spontané. Ainsi, la mesure et le suivi de ce potentiel spontané PS permet de « monitorer » (ou surveiller en temps réel) l'ouverture de ces
35 fractures et de quantifier l'amélioration de la perméabilité du réservoir.

On peut aussi noter qu'il existe, dans le domaine pétrolier, des dispositifs de mesures de Potentiel Spontané à l'échelle du puits (mesures dites diagraphiques). On connaît par exemple

les brevets US 2713146 et EP 0426563 (US 5008625) qui permettent de réaliser des mesures de Potentiel Spontané dans un puits traversant une formation géologique. De tels dispositifs sont notamment utilisés afin d'évaluer la quantité d'argile dans les formations sédimentaires.

5

La polarisation spectrale induite (notée PSI par la suite), aussi appelée Polarisation Provoquée Spectrale (PPS ; Spectral Induced Polarization en anglais), mesure un spectre de résistivité complexe (que l'on peut représenter par une partie réelle R et une partie imaginaire X , ou encore par une amplitude et une phase) dans une gamme de fréquences donnée. Cette technique a été notamment utilisée en prospection minière par Conrad Schlumberger qui constate en 1912 un effet de polarisation sur les gisements de minerais de fer. Puis, son application s'est étendue à la recherche de nappes phréatiques, de fronts salins et de lentilles d'argiles. Ce n'est que vers les années 80 que les recherches se focalisent sur la sensibilité de la polarisation aux contaminants.

Notamment le document (Olhoeft, 1985) catalogue différents effets de polarisation des roches (réactions d'oxydo-réduction, échanges ioniques et interaction entre le solvant organique et l'argile) à partir de mesures de résistivité électrique complexe en laboratoire. Ces mesures ont été réalisées sur des échantillons non consolidés (c'est-à-dire prélevés en proche surface) et dans des conditions de mesure de surface (pression atmosphérique et température ambiante notamment). Il établit alors une gamme de fréquences effectives (c'est-à-dire permettant d'observer les effets souhaités pour les échantillons considérés dans les conditions considérées) comprise entre 1mHz et 10KHz. Cette gamme de fréquences est alors reprise par différents auteurs pour réaliser des mesures de terrain, notamment en vue de la détection de contaminants. Ainsi, en suivant le protocole établi dans Olhoeft (1985), Daily et al. (2004) ont montré que les zones contaminées par des hydrocarbures pouvaient être identifiées par de faibles valeurs de phase (inférieures à 350 mrad) et par des anomalies sur l'amplitude et la phase aux fréquences comprises entre 0.01 et 100 Hz. Les travaux de Binley *et al.* (2005) montrent l'apport de la mesure de la PSI pour l'estimation des propriétés de transport (c'est-à-dire la perméabilité) et la détermination de l'état de saturation en eau des aquifères en zone non saturée et saturée. Ces auteurs ont notamment établi une image 2D-3D de PSI de la proche surface et ont transcrit cette image en une image de perméabilité et de saturation en eau du milieu. Notamment Scott and Barker (2003) ont montré que l'analyse des PSI à faibles fréquences (inférieures à 100 Hz) permet de déterminer directement la taille de connexion des pores dans un réservoir donné. Ainsi, ces mesures de PSI ont par le passé été réalisées sur le terrain dans le domaine des basses fréquences (au maximum 10 kHz), uniquement dans des conditions de surface, et ont visé des mesures sur des portions de formations souterraines non consolidées, c'est-à-dire des portions de formations souterraines de proche surface.

A noter qu'il existe des outils de diagraphies dits de « résistivité » (par exemple le brevet EP 0384823 A1) qui permettent de mesurer la résistivité d'une formation souterraine dans une région autour du puits. Toutefois, les outils de diagraphies de résistivité existants mesurent la
5 résistivité en mode mono-fréquentiel, la fréquence d'émission étant par exemple égale à 500 Hz, ou à 1 kHz ou à 100 MHz en fonction des outils utilisés.

Ainsi, les mesures de potentiel spontané et de polarisation spectrale induite ont déjà été mises en œuvre par le passé. Toutefois, il n'est à ce jour pas connu ni de dispositif ni de
10 procédé intégrant ces deux types de mesures, ni à l'échelle du laboratoire, ni à l'échelle du puits. De plus, il n'est à ce jour pas connu de procédé incluant une étape de mesures de la résistivité complexe dans une large bande de fréquences, et ce, ni au cours de mesures de laboratoire ni au cours de mesures de puits.

L'un des objets de la présente invention est un dispositif intégrant à la fois un moyen de mesure du potentiel spontané et un moyen de mesure de la résistivité électrique complexe dans une large bande de fréquences (par exemple entre 10mHz et 30 MHz). Un tel dispositif intégré permet de garantir que les deux types de mesure soient réalisés strictement dans les mêmes
15 conditions, ce qui accroît la fiabilité de la mesure. Ce dispositif peut être décliné à la fois à l'échelle du laboratoire et à l'échelle du puits (c'est un outil de diagraphie dans ce cas). De plus, les mesures réalisées à partir du dispositif selon l'invention peuvent être entièrement automatisées et/ou collectées et/ou analysées sans intervention humaine.

L'un des objets de l'invention consiste en un procédé mettant en œuvre à la fois le dispositif de laboratoire et le dispositif de puits ainsi décrits. Notamment, ce procédé peut
25 permettre, par une calibration entre les mesures de puits et les mesures de laboratoire, de quantifier des paramètres pétrophysiques relatifs à la formation étudiée, telles que la perméabilité relative et la saturation en eau. Ces paramètres pétrophysiques sont alors utiles pour la détermination d'un schéma d'exploitation optimal de la formation.

Le dispositif selon l'invention

De façon générale, l'objet de l'invention concerne un dispositif pour la détermination de paramètres pétrophysiques d'une portion d'une formation souterraine comprenant un fluide,
35 ledit dispositif comprenant :

- au moins deux électrodes ;
- un moyen d'émission d'un courant électrique variable en fréquences et un moyen de mesure de la résistivité électrique en amplitude et en phase, deux dites électrodes coopérant avec ledit moyen d'émission et au moins deux desdites électrodes coopérant avec le dit moyen de mesure de la résistivité ;
- un moyen de mesure d'une différence de potentiel électrique coopérant avec au moins deux desdites électrodes ;
- un moyen d'automatisation des mesures réalisées par lesdits moyens de mesure, et/ou un moyen de collecte desdites mesures et/ou un moyen d'analyse desdites mesures.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, lesdites fréquences peuvent être comprises dans une gamme de fréquences dont la borne inférieure est comprise entre 1 et 20 mHz, et la borne supérieure est comprise entre 28 et 32 MHz.

Avantageusement, lesdites électrodes peuvent être en matériau métallique impolarisable.

Préférentiellement, le nombre desdites électrodes peut être compris entre 4 et 8, de préférence 6.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, une partie des électrodes peut être distribuées sur une longueur d'un support formé d'un matériau isolant.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, ledit dispositif peut être destiné à des mesures de laboratoire, ladite portion de ladite formation étant un échantillon de ladite formation, par exemple prélevé par carottage, et :

- ledit support peut être un manchon souple de forme sensiblement cylindrique destiné à recevoir ledit échantillon ;
- lesdites électrodes peuvent être au moins au nombre de quatre et deux desdites électrodes sont placées de manière à être en contact avec chacune des sections libres dudit échantillon ;
- ladite longueur dudit support peut être orientée selon l'axe de révolution dudit support.

Selon un mode de réalisation dudit dispositif pouvant être destiné à des mesures de laboratoire, ledit manchon peut être une gaine thermo-rétractable et au moins deux desdites électrodes peuvent être piquées sur ladite gaine, de manière à traverser ladite gaine.

5

Selon un mode de réalisation dudit dispositif pouvant être destiné à des mesures de laboratoire, ledit dispositif peut comprendre en outre des moyens pour injecter un fluide de travail dans ledit échantillon et pour réguler le débit dudit fluide de travail, et un moyen de mesure de la pression fluide en au moins deux endroits dudit échantillon.

10

Selon un mode de mise en oeuvre dudit dispositif pouvant être destiné à des mesures de laboratoire, ledit dispositif peut comprendre en outre une cellule de confinement hydraulique et/ou des moyens de régulation de la température.

15

Selon un mode de réalisation dudit dispositif pouvant être destiné à des mesures de laboratoire, ledit dispositif peut comprendre en outre des moyens de mesures géochimiques tels que des moyens de mesure de l'alcalinité, de la conductivité, des teneurs en cations-anions majeurs, des teneurs en éléments traces, de la teneur en gaz dissous après prélèvement.

20

Selon un mode de mise en oeuvre de l'invention, ledit dispositif peut être destiné à des mesures au sein d'au moins un puits foré dans ladite formation telles que des mesures diagaphiques, ladite portion de ladite formation étant une zone entourant ledit puits dans lequel est inséré ledit dispositif, ledit dispositif pouvant être de forme sensiblement cylindrique, lesdites électrodes pouvant être des anneaux de diamètre légèrement supérieur au diamètre dudit support et pouvant être distribuées le long de l'axe de révolution dudit cylindre.

25

Selon un mode de mise en oeuvre dudit dispositif pouvant être destiné à des mesures au sein d'au moins un puits foré dans ladite formation, lesdits moyens de mesures de la résistivité, lesdits moyens de mesure de différence de potentiel électrique, lesdits moyens d'émission d'un courant électrique peuvent être destinés à être placés à la surface de ladite formation et peuvent coopérer avec lesdites électrodes par des moyens de connexion résistants aux conditions de pression et de température inhérentes à des mesures dans des puits.

30

L'invention concerne également un procédé d'exploitation d'une formation souterraine comportant un fluide, à partir d'au moins un échantillon de ladite formation, ladite formation étant traversée par au moins un puits, ledit procédé pouvant comporter au moins les étapes suivantes :

- 5 i. pour au moins une condition de mesure, on réalise au moins des mesures de potentiel spontané et de polarisation spectrale induite sur ledit échantillon au moyen d'un des modes de réalisation du dispositif destiné à des mesures de laboratoire, et on détermine des paramètres pétrophysiques représentatifs dudit échantillon ;
- 10 ii. on réalise des mesures de potentiel spontané et de polarisation spectrale induite dans ledit puits au moyen d'au moins un dispositif selon un des modes de réalisation du dispositif destiné à des mesures au sein d'un puits ;
- iii. on calibre lesdites mesures réalisées dans ledit puits à l'aide desdites mesures réalisées sur ledit échantillon et on déduit des paramètres pétrophysiques
15 représentatifs de ladite formation ;
- iv. à partir desdits paramètres pétrophysiques représentatifs de ladite formation, on définit un schéma d'exploitation optimal de ladite formation et on exploite ladite formation à partir dudit schéma.

20 Selon un mode mise en œuvre du procédé selon l'invention, au cours de l'étape i), on peut mesurer :

- a) un gradient de pression induit dans ledit échantillon, au moyen dudit moyen de mesure de la pression du fluide ;
- 25 b) une différence de potentiel électrique induit dans ledit échantillon, au moyen dudit moyen de mesure d'une différence potentiel électrique ;
- c) une polarisation spectrale induite au sein dudit échantillon, au moyen dudit moyen de mesure de la polarisation spectrale induite ;

et on répète lesdites mesures a), b) et c) pour différents débits de fluide et pour différentes saturations en fluide.

30 Selon un mode mise en œuvre du procédé selon l'invention, lesdites mesures a), b) et c) peuvent être répétées pour différentes pressions de confinement et/ou différentes températures.

Selon un mode mise en œuvre du procédé selon l'invention, lesdits paramètres pétrophysiques représentatifs de ladite formation et/ou dudit échantillon peuvent être la perméabilité relative et/ou la saturation.

- 5 Selon un mode mise en œuvre du procédé selon l'invention, l'étape ii) peut être répétée au fur et à mesure de l'exploitation de ladite formation.

10 D'autres caractéristiques et avantages du procédé selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'exemples non limitatifs de réalisations, en se référant aux Figures annexées et décrites ci-après.

Présentation succincte des figures

- 15 - la Figure 1 correspond à un exemple de mesures de Polarisation Spectrale Induite réalisées au moyen d'une variante du dispositif selon l'invention, dans le cas d'un échantillon de calcaire de Brauvilliers et pour différentes saturations S_w en saumure de cet échantillon.
- 20 - la Figure 2 présente une variante de réalisation du dispositif selon l'invention destinée à des mesures de laboratoire.
- la Figure 3 présente une variante de réalisation du dispositif selon l'invention destinée à des mesures de puits.
- 25 - la Figure 4 présente un exemple de configuration destinée à la surveillance permanente d'un site d'exploitation d'un fluide contenu au sein d'une formation, comprenant deux dispositifs selon l'invention destinés à des mesures de puits.
- La Figure 5 présente l'évolution de la différence de potentiel électrique dV en fonction de la variation de pression fluide dP pour différents échantillons provenant d'une formation souterraine.
- 30 - La Figure 6 présente l'évolution du coefficient de couplage électrocinétique relatif Cr en fonction de la saturation en fluide S_w , pour différentes positions d'électrodes illustrées en Figure 2, dans le cas d'un calcaire de Brauvilliers.
- La Figure 7 présente l'évolution de l'angle de phase P de la résistivité électrique complexe en fonction de la fréquence F dans le cas d'un calcaire de Brauvilliers, et ce pour différentes saturations en saumure S_w .

Description détaillée du dispositif

L'un des objets de l'invention concerne un dispositif pour une mesure intégrée de la
5 résistivité électrique complexe et du potentiel spontané, en vue de déterminer des paramètres
pétrophysiques relatifs à une portion d'une formation souterraine comportant un fluide. Ces
paramètres pétrophysiques sont notamment utiles pour définir un schéma d'exploitation optimal
de la formation souterraine étudiée.

10 Une portion de la formation souterraine étudiée peut être par exemple :

- un échantillon de la formation, prélevé par carottage par exemple : dans ce cas, le
dispositif selon l'invention est destiné à des mesures dites « de laboratoire » et est appelé
« dispositif de laboratoire selon l'invention » par la suite ;
- une zone entourant un puits foré dans la formation étudiée et dans lequel le dispositif est
15 inséré ; dans ce cas, le dispositif selon l'invention est destiné à des mesures dites
« diagraphiques » et est appelé « dispositif de puits selon l'invention » par la suite.

Le dispositif selon l'invention comprend :

- au moins deux électrodes ;
- 20 - un moyen d'émission d'un courant électrique variable en fréquences, connecté à au
moins deux électrodes ;
- un moyen de mesure de la résistivité électrique en amplitude et en phase (ou moyen de
mesure de résistivité électrique complexe), connecté à au moins deux autres électrodes ;
- un moyen de mesure d'une différence de potentiel électrique, connecté à au moins deux
25 électrodes.

Ainsi, le dispositif selon l'invention permet de réaliser de façon intégrée et en une seule
expérience au moins deux types de mesures : une mesure de potentiel spontané (au moyen
d'au moins deux des électrodes et du moyen de mesure d'une différence de potentiel
électrique) et une mesure de polarisation spectrale induite (au moyen d'au moins deux des
30 électrodes, du moyen d'émission d'un courant électrique variable en fréquences, et du moyen
de mesure de la résistivité électrique en amplitude et en phase).

Par conséquent, le dispositif selon l'invention permet de garantir que deux types de
mesures, à savoir des mesures de Potentiel Spontané et des mesures de Polarisation
Spectrale Induite, soient réalisés dans les mêmes conditions d'expérience (portion de la
35 formation identique et non dégradée par des mesures successives, positions strictement

identiques des électrodes pour les deux types de mesure, conditions de pression et de température strictement identiques, etc), ce qui accroît la fiabilité de la mesure.

De plus, disposer d'un seul et même dispositif de mesures intégrées permet, pour un industriel, de réduire les coûts globaux d'exploitation du dispositif (frais d'achat et de maintenance réduits à un seul dispositif, réduction du nombre de manipulations par le technicien en charge des expériences).

En outre, la combinaison des mesures de Potentiel Spontané et des mesures de Polarisation Spectrale Induite permet d'accéder à des paramètres pétrophysiques primordiaux pour la caractérisation de la portion de la formation étudiée, et par la même pour la définition d'un schéma d'exploitation optimale de la formation étudiée. Ce point sera plus largement développé ci-après dans la description du procédé selon l'invention.

Selon une mise en œuvre de l'invention, le moyen de mesure de la résistivité électrique en amplitude et en phase comprend un moyen de mesure de la différence de potentiel électrique et un moyen de traitement de la mesure de la différence de potentiel électrique. Le moyen de traitement de la mesure de différence de potentiel électrique permet de déterminer l'amplitude et la phase de la mesure de différence de potentiel électrique réalisée pour un courant électrique émis à une fréquence donnée au moyen du moyen d'émission d'un courant électrique variable en fréquences.

Par ailleurs, le dispositif selon l'invention comporte un moyen d'automatisation des mesures réalisées par le dispositif selon l'invention, et/ou un moyen de collecte et/ou d'analyse desdites mesures. De cette manière, via le moyen d'automatisation, les mesures à réaliser par le dispositif selon l'invention peuvent être pré-programmées et ne nécessitent pas une intervention humaine pour modifier manuellement les paramètres de mesure (intensité du courant injecté, fréquences échantillonnées etc) et/ou les conditions de mesure (pression environnante, température, saturation en fluide etc). Le moyen de collecte des mesures permet en outre de récolter, centraliser et stocker l'ensemble des mesures réalisées par le dispositif selon l'invention, de façon automatique via le moyen d'automatisation, ou avec intervention humaine. Enfin, le moyen d'analyse des mesures, réalisées de manière automatisée ou manuellement par un technicien, collectées par un moyen de collecte ou manuellement par un technicien, peuvent être analysées de façon automatique et systématique par un moyen d'analyse. Ce moyen d'analyse peut comprendre un ordinateur sur lequel est implémenté un logiciel permettant d'analyser les mesures issues du dispositif selon l'invention. Par exemple, ce logiciel peut permettre de tracer une pluralité de courbes, représentant les valeurs mesurées en fonction de différents paramètres de mesure et/ou conditions de mesure, paramètres et conditions qui ont été par exemple pré-programmés à l'avance par le spécialiste.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, les fréquences émises par le moyen d'émission d'un courant électrique variable en fréquences sont comprises entre 1 μ Hz et 1 GHz. De cette manière, et à l'aide du moyen de mesure de la résistivité électrique en amplitude et en phase selon l'invention, on accède à une estimation de la polarisation spectrale induite (notée PSI par la suite) dans une large gamme de fréquences. La Figure 1 présente un exemple de résultat de mesures de Polarisation Spectrale Induite, notamment leur partie réelle R et leur partie imaginaire X, pour des fréquences comprises entre 1 μ Hz et 1 GHz, les mesures ayant été réalisées sur un échantillon de roche donné (calcaire de Brauvilliers de type « grainstone à oolithes »), et ce pour différentes saturations S_w en saumure (entre 27% et 100%, les valeurs croissant selon la direction indiquée par la flèche, une valeur de $S_w=100\%$ correspondant à une saturation totale en saumure) et différents types de saumure (saumure à 10g de NaCl et saumure à 5g de NaCl en l'occurrence). On peut notamment distinguer sur cette figure trois domaines dans lesquelles les mesures de PSI ont des comportements sensiblement distincts : celui des basses fréquences (domaine D1), celui des moyennes fréquences (domaine D2), et celui des hautes fréquences (domaine D3). Ainsi, dans le domaine :

- des basses fréquences (domaine D1), c'est-à-dire pour des fréquences inférieures par exemple à 20 Hz (à noter que cette fréquence peut être fonction des matériaux), la PSI est particulièrement sensible, dans le cas d'une saturation en saumure de 100%, à la taille des grains polarisables, à la surface spécifique, à la taille des pores, à la perméabilité, et au facteur de cimentation m d'Archie, alors que dans le cas d'un milieu diphasique (comprenant de l'eau ou saumure, et un autre fluide non conducteur tel que du gaz ou/et de l'huile), au pourcentage de saturation en saumure S_w . On peut montrer que la PSI peut être caractérisée dans le domaine des basses fréquences par deux paramètres : un temps de relaxation (aussi appelé fréquence critique basse fréquence) et un angle de phase ;
- des moyennes fréquences (domaine D2), c'est-à-dire pour des fréquences comprises par exemple entre 20 Hz et 30 kHz, les variations de la PSI se présentent sous la forme d'un plateau et la PSI est sensible notamment à la saturation du milieu, à la perméabilité, et à la surface spécifique ;
- des hautes fréquences (domaine D3), c'est-à-dire pour des fréquences supérieures par exemple à 0.03 MHz, les variations de PSI sont à nouveau très sensibles à la fréquence, ce qui permet d'obtenir des informations notamment sur la permittivité diélectrique relative, la saturation du milieu poreux, la porosité et la capacité d'échange cationique.

Préférentiellement, le dispositif selon l'invention permet d'émettre un signal électrique dans une gamme de fréquences dont la borne inférieure est comprise entre 1 et 20 mHz (et préférentiellement égale à 10 mHz), et la borne supérieure est comprise entre 28 et 32 MHz (et préférentiellement égale à 30 MHz), ce qui permet de limiter les temps dévolus à la mesure, tout en permettant d'accéder aux quantités précitées. En effet, comme montré en Figure 1, ces valeurs limites de la gamme de fréquences préférentielle sont suffisantes afin de « capturer » les grandes tendances des variations de la résistivité électrique complexe en fonction de la fréquence émise, ce qui permettra d'en déduire des paramètres pétrophysiques (tels que saturation, perméabilité, porosité etc) caractéristiques de la portion de formation considérée.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, les mesures de Polarisation Spectrale Induite sont réalisées pour une cinquantaine de valeurs de fréquence distinctes et échantillonnant, sur une échelle logarithmique, la gamme de fréquence choisie de manière régulière.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, les électrodes du dispositif selon l'invention sont constituées dans un matériau conducteur (tel que du métal) impolarisable (par exemple composé d'argent ou de chlorure d'argent). Ce mode de réalisation permet de réaliser des mesures électriques successives, sans avoir à attendre un temps de retour des électrodes à un état électrique neutre. Un gain de temps sur l'ensemble des expériences à réaliser, pour une succession de fréquences comprises dans une gamme donnée et selon un pas d'échantillonnage donné, est ainsi obtenu.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, le dispositif comprend entre quatre et huit électrodes, de préférence six. La pluralité d'électrodes permet de réaliser des mesures de différence de potentiel électrique et/ou de résistivité électrique à différents emplacements de la portion de formation étudiée et ainsi de mieux caractériser la portion de formation.

Préférentiellement, le dispositif comprend en outre un support, formé d'un matériau isolant, au moins une partie des électrodes étant distribuées sur une longueur du support en question. Les dimensions et la forme du support sont fonction des dimensions et de la forme de la portion de la formation considérée, et ce, de manière à ce que la partie des électrodes du dispositif distribuées sur une longueur du support soient en contact avec la portion de la formation étudiée.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention dans lequel la portion de la formation étudiée est un échantillon de la formation, prélevé par carottage par exemple, le support peut être un manchon souple, le long duquel une partie des électrodes sont distribuées, les dimensions du support permettant que les électrodes en question soient en contact avec

l'échantillon étudié lorsque ce dernier est inséré dans le manchon. Un échantillon prélevé d'une formation souterraine étant en général de forme sensiblement cylindrique, le manchon est de préférence également de forme sensiblement cylindrique ; sa circonférence peut être légèrement supérieure à celle de l'échantillon, de manière à ce que l'échantillon puisse être inséré dans le manchon tout en étant maintenu.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention dans lequel la portion de la formation est une zone entourant un puits foré dans la formation étudiée, le support est de forme sensiblement cylindrique (un puits ayant une forme très généralement cylindrique). Les électrodes sont distribuées le long de l'axe de révolution du support, et la circonférence du support est en relation avec la circonférence dudit puits de manière à ce que le support puisse être inséré dans le puits et à ce que les électrodes soient en contact avec la portion de la formation à étudier. Avantageusement, les électrodes sont des anneaux de diamètre légèrement supérieur au diamètre du support, et fixés audit support. La réception et l'émission de courant est alors possible de façon radiale dans la formation étudiée.

Premier mode principal de réalisation : dispositif pour mesures de laboratoire

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention dans lequel le dispositif selon l'invention est destiné à des mesures de laboratoire sur un échantillon de la formation étudiée (dit premier mode principal de réalisation de l'invention par la suite ou encore dispositif pour mesures de laboratoire selon l'invention), deux électrodes sont disposées régulièrement le long de l'axe de révolution du manchon et deux autres électrodes sont libres et pourront être placées de façon à établir un contact électrique sur chacune des sections libres de l'échantillon de formation inséré dans le manchon. Les électrodes placées sur les sections libres sont reliées au moyen d'émission du courant électrique variable en fréquences, et les au moins deux autres électrodes distribuées sur le manchon sont reliées au moyen de mesure de la résistivité électrique en amplitude et en phase. Avantageusement l'ensemble des électrodes est aussi relié au moyen de mesure de différence de potentiel électrique, par exemple via un multiplexeur.

Dans une variante de ce premier mode principal de réalisation de l'invention, le manchon en question peut comprendre une gaine thermo-rétractable. Ce type de gaine résiste notamment aux fortes températures et aux fortes pressions tout en préservant l'étanchéité de la gaine. Ce type de gaine est de plus inerte du point de vue physico-chimique. Avantageusement, deux électrodes sont piquées au travers de la gaine (de manière à traverser cette gaine), et à permettre ainsi le contact avec l'échantillon inséré dans la gaine. Ces électrodes sont reliées électriquement au moyen de mesures de la résistivité électrique complexe, et préférentiellement également au moyen de mesure du potentiel électrique. Au moins deux autres électrodes sont en contact direct avec l'échantillon et sont reliées électriquement au moyen d'émission d'un

courant électrique variable en fréquences, et préférentiellement également au moyen de mesure du potentiel électrique.

5 Dans une autre variante de ce premier mode principal de mise en œuvre de l'invention, le dispositif comprend en outre des moyens pour injecter un fluide de travail dans l'échantillon et pour réguler le débit dudit fluide de travail.

10 Les moyens pour injecter un fluide de travail dans ledit échantillon et pour réguler le débit dudit fluide de travail peuvent permettre de réaliser des mesures de résistivité électrique complexe et des mesures de potentiel spontané pour différents types de fluides (eau, huile, gaz notamment) et pour différentes valeurs de saturation respective de ces fluides. Ceci permet d'évaluer des paramètres pétrophysiques relatifs à un échantillon d'une formation souterraine pour différentes conditions de saturation en fluide (différents fluides et pour différentes saturations). Ces différentes mesures peuvent notamment permettre de tracer des abaques qui permettent d'informer le spécialiste des paramètres pétrophysiques attendus pour la formation
15 considérée, en fonction des différentes conditions de saturation possibles.

Un moyen de mesure de la pression fluide en au moins deux endroits de l'échantillon sera avantageusement combiné aux moyens pour injecter un fluide de travail dans l'échantillon et pour réguler le débit dudit fluide de travail. Cette configuration de mesure permet notamment de réaliser des mesures de coefficient de couplage électrocinétique en milieu saturé.

20 Avantageusement, le premier mode principal de mise en œuvre de l'invention peut comprendre en outre une cellule de confinement hydraulique, destinée à recevoir l'échantillon. La cellule de confinement peut permettre de soumettre l'échantillon de la formation considérée à des fortes pressions (par exemple de l'ordre de 5 MPa). Ceci permet de simuler, dans le
25 cadre d'une mesure de laboratoire, les conditions de pression existantes dans la formation souterraine, qui peuvent être de l'ordre de 8 à 40 MPa. Les mesures de potentiel spontané et de résistivité électrique réalisées dans des conditions se rapprochant des conditions in situ (c'est-à-dire dans les conditions de pression du réservoir de fluide étudié), les paramètres pétrophysiques que l'on peut déduire de ces mesures sont représentatifs des paramètres
30 pétrophysiques réels, in situ, contrairement à des mesures qui sont réalisées dans des conditions de surface (pression de 1 MPa environ).

Avantageusement, le premier mode principal de réalisation de l'invention peut comprendre en outre un moyen de régulation de la température, au sein de ladite cellule de
35 confinement le confinement, de sorte à simuler les conditions de température au sein de la formation étudiée (et qui peuvent atteindre 60 à 150 °C).

En outre, le premier mode principal de mise en œuvre de l'invention peut comprendre des moyens de mesures géochimiques tels que des moyens de mesure de l'alcalinité, de la conductivité, des teneurs en cations-anions majeurs, des teneurs en éléments traces ainsi que la teneur en gaz dissous après prélèvement. Le spécialiste dans le domaine de la géochimie pétrolière a parfaite connaissance de moyens pour effectuer de telles mesures. Ces mesures permettent de renseigner le spécialiste sur les caractéristiques précises des fluides et gaz en présence, ce qui peut contribuer à affiner le schéma d'exploitation optimal visé par la présente invention.

La Figure 2 présente une variante du premier mode principal de mise en œuvre du dispositif selon l'invention, les différents éléments du dispositif en question pouvant être agencés de façon différente. Ainsi, cette figure décrit un dispositif comprenant un support SU de forme cylindrique, 4 électrodes EL dont deux électrodes distribuées le long du support SU et deux autres électrodes EL libres, destinées à être placées sur chacune des sections libres de l'échantillon de formation inséré dans le support SU. Les électrodes EL à placer sur les sections libres sont reliées au moyen d'émission du courant électrique MEC variable en fréquences, et les deux autres électrodes EL distribuées sur le manchon SU sont reliées au moyen de mesure de la résistivité électrique MRE en amplitude et en phase. Selon cet exemple non limitatif de réalisation de l'invention, seules deux des quatre électrodes A, D sont reliées au moyen de mesure de différence de potentiel électrique MDP, permettant des mesures de différence de potentiel spontané uniquement entre les électrodes A et D, mais des connections pourraient être réalisées entre chacune des électrodes A, B, C, D et le moyen de mesure de différence de potentiel électrique MDP afin de permettre une mesure de différence de potentiel entre les électrodes A et B, A et C, et A et D par exemple. Par ailleurs, dans cet exemple de réalisation, le moyen d'émission du courant électrique MEC variable en fréquences, le moyen de mesure de la résistivité électrique MRE en amplitude et en phase, et le moyen de mesure de différence de potentiel électrique MDP sont reliés à un automate AUT permettant que les mesures à réaliser par le dispositif selon l'invention soient pré-programmées, permettant ainsi d'éviter toute intervention humaine pour modifier manuellement les paramètres de mesure (intensité du courant injecté, fréquences échantillonnées etc).

Deuxième mode principal de réalisation : dispositif pour mesures diagraphiques

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention dans lequel le dispositif selon l'invention est destiné à des mesures au sein d'au moins un puits foré dans la formation étudiée telles que des mesures diagraphiques (dit second mode principal de réalisation du dispositif selon

l'invention, ou encore dispositif pour des mesures de puits par la suite), les moyens de mesures de la résistivité complexe, les moyens de mesure de différence de potentiel électrique, les moyens d'émission d'un courant électrique sont destinés à être placés à la surface de ladite formation et sont reliés auxdites électrodes par des moyens de connexion résistants aux conditions de pression et de température inhérentes à des mesures dans des puits.

Ce mode principal de réalisation du dispositif selon l'invention permet de réaliser, avec un seul outil de diagraphe, deux types de mesure (électriques en l'occurrence), ce qui est très avantageux d'un point de vue opérationnel car la mise en œuvre des mesures diagraphiques est bien connue pour être de haute technicité et coûteuse. De plus, on est assuré de cette façon que les deux mesures sont parfaitement réalisées à la même profondeur dans le puits et sont représentatives de la même portion.

Selon un mode de mise en œuvre de ce deuxième mode principal de réalisation de l'invention, les électrodes sont mises en contact direct avec la paroi du puits et donc avec la formation géologique. Selon un mode de réalisation de ce deuxième mode principal de réalisation de l'invention, les dimensions du dispositif pour mesures de puits sont de l'ordre de 2500 mm de longueur et 45 mm de diamètre. Avantageusement, les électrodes sont réparties de façon uniforme sur une longueur du support de 2100 mm, la distance entre deux électrodes consécutives étant de 30 mm.

La Figure 3 présente une variante du deuxième mode principal de réalisation du dispositif selon l'invention, pour des mesures de puits, les différents éléments du dispositif en question pouvant être agencés de façon différente. Dans l'exemple présenté, le support SU est un tube cylindrique placé dans un puits W foré dans une formation F, le long duquel sont distribuées 7 électrodes annulaires EL, chaque électrode étant reliée au moyen de mesure du potentiel spontané MDP et au moyen de mesure de la résistivité électrique MRE complexe, les électrodes se trouvant aux deux extrémités du support étant de plus reliées au moyen d'émission du courant électrique MEC variable en fréquences. De plus, les moyens de mesure de la résistivité électrique MRE complexe, du potentiel spontané MDP et les moyens d'émission du courant électrique MEC variable en fréquences sont placés en surface.

Procédé d'exploitation d'une formation souterraine :

En outre, l'invention concerne un procédé d'exploitation d'une formation souterraine comportant un fluide. Ce procédé requiert au moins un échantillon prélevé au sein de la formation étudiée, la formation étant traversée par au moins un puits, et comprend au moins les étapes suivantes :

- **Etape 1** : pour au moins une condition de mesure, on réalise des mesures de potentiel spontané et de polarisation spectrale induite sur l'échantillon considéré au moyen d'un mode de mise en œuvre du dispositif pour mesures de laboratoire comprenant des moyens pour injecter un fluide de travail dans l'échantillon, des moyens pour réguler le débit du fluide de travail, ainsi qu'un moyen de mesure de la pression fluide en au moins deux endroits dudit échantillon, et on détermine des paramètres pétrophysiques représentatifs dudit échantillon ;
- **Etape 2** : on réalise des mesures de potentiel spontané et de polarisation spectrale induite dans le puits considéré au moyen d'au moins un dispositif selon l'une quelconque des variantes du deuxième mode principal de mise en œuvre du dispositif selon l'invention (c'est-à-dire le mode de réalisation destiné aux mesures de puits) ;
- **Etape 3** : on compare les valeurs des mesures réalisées dans le puits avec les mesures réalisées sur le dit échantillon, et par calibration, on déduit des paramètres pétrophysiques représentatifs de ladite formation ;
- **Etape 4** : à partir desdits paramètres représentatifs de ladite formation, on définit un schéma d'exploitation optimal du fluide de la formation étudiée et on exploite le fluide de la formation à partir dudit schéma.

Ainsi, le procédé selon l'invention comprend la mise en œuvre de mesures de différents types (PS et PSI au moins) et à des échelles différentes (échelle du puits et échelle du laboratoire). Nous allons ci-après détailler les différentes étapes du procédé selon l'invention.

Etape 1

Au cours de cette étape, le procédé selon l'invention est mis en œuvre au moyen d'une variante du premier mode principal de mise œuvre du dispositif selon l'invention, comprenant, des moyens pour injecter un fluide de travail dans ledit échantillon et pour réguler le débit dudit fluide de travail, ainsi qu'un moyen de mesure de la pression fluide en au moins deux endroits dudit échantillon.

Les mesures effectuées à l'aide de ce dispositif (appelées « mesures de laboratoire » par la suite) sont réalisées pour au moins une condition de mesure. On entend par « condition de mesure » l'ensemble des paramètres selon lesquels est effectuée la mesure, comme par exemple la pression, la température, le ou les fluides présents dans l'échantillon, la saturation de chacun des fluides présents dans l'échantillon. Très préférentiellement, les mesures de laboratoire sont réalisées dans des conditions de mesure représentatives des conditions (de pression, de température, de saturations des fluides en présence) auxquelles est soumise la formation étudiée, que l'on appellera « conditions in situ » par la suite. A noter que les conditions in situ ne sont généralement pas précisément connues mais le spécialiste peut

disposer des ordres de grandeur ou gammes des conditions in situ (gammes relatives aux pressions et/ou aux températures et/ou aux saturations des fluides en présence). Les mesures de laboratoire sont avantageusement réalisées pour une pluralité de conditions de mesure, échantillonnant notamment les gammes des valeurs présumées des conditions in situ.

5 A partir desdites mesures de laboratoire, on détermine des paramètres pétrophysiques relatifs à l'échantillon considéré pour la ou les conditions de mesures considérées (conditions de pression et/ou de température et/ou de saturation en fluides). Le spécialiste a parfaite connaissance de méthodes pour déterminer des paramètres pétrophysiques à partir de mesures de PSI et de PS. Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, les paramètres
10 pétrophysiques représentatifs de l'échantillon sont la perméabilité relative et/ou la saturation en fluide. Lorsque des mesures ont été réalisées pour une pluralité de conditions de mesure, le spécialiste peut dresser un abaque représentant les valeurs des mesures réalisées, les paramètres pétrophysiques déduits de ces mesures, et ce pour chaque condition de mesure.

15 Selon un mode de mise en œuvre du procédé selon l'invention, pour au moins une pression de confinement prédéfinie, une température, une saturation en fluide prédéfinie, un débit de fluide prédéfini, et une injection de fluide de travail donné dans ledit échantillon, on mesure :

a. le gradient de pression induit dans l'échantillon, au moyen du moyen de mesures
20 de la pression fluide ;

b. la différence de potentiel électrique induit dans l'échantillon, au moyen du moyen de mesure de différence de potentiel électrique ;

c. la polarisation spectrale induite au sein dudit échantillon, au moyen du moyen de mesure de la polarisation spectrale induite ;

25 et on répète les mesures a), b) et c) pour différents débits de fluide et/ou pour différentes saturations en fluide et/ou pour différents fluides de travail. On décline ci-après des méthodes non limitatives d'exploitation des mesures ainsi réalisées afin de déterminer la perméabilité relative et la saturation en fluide.

30 *Détermination de paramètres pétrophysiques*

Les mesures de potentiel spontané permettent de mesurer une différence de potentiel électrique (que l'on notera dV par la suite). Combinées aux mesures de gradient de pression (que l'on notera dP par la suite), on obtient un coefficient couplage électrocinétique C selon une formule du type :

35
$$C = dV/dP,$$

Selon le mode de mise en œuvre décrit ci-dessus, les mesures étant réalisées pour différentes conditions de saturation en fluide, on peut définir un coefficient de couplage électrocinétique en milieu saturé C_{sat} et un coefficient de couplage électrocinétique en milieu non saturé $C(S_w <= 1)$. On définit alors un coefficient de couplage électrocinétique relatif Cr , correspondant
 5 au rapport entre le coefficient électrocinétique en milieu saturé C_{sat} et le coefficient électrocinétique en milieu non saturé $C(S_w <= 1)$. On peut également estimer un coefficient d'électroosmose $C_{electro}$ qui quantifie la variation de pression fluide induite par une différence de potentiel électrique.

Par ailleurs, les mesures de PSI réalisées selon le mode de mise en œuvre décrit ci-
 10 dessus permettent de mesurer la résistivité complexe, en milieu saturé et en milieu non saturé. De ces mesures, on peut déduire par exemple les paramètres suivants :

- un angle de phase Θ , à partir d'une formule du type : $\tan \Theta = X/R$, où R est la partie réelle de la résistivité et X est la partie imaginaire ;

- un temps de relaxation τ , une fréquence critique F_c ;

- un indice de résistivité $I_R = \frac{R_t}{R_o}$, où R_t et R_o sont respectivement la partie réelle de la
 15 résistivité en milieu non saturé et en milieu saturé ;

- un facteur de formation $F = \frac{R_o}{R_w}$, où R_o est la résistivité du milieu saturé à 100% en saumure, R_w est la résistivité de la saumure R .

A partir de l'angle de phase Θ , du facteur de formation F , du temps de relaxation τ , et de la
 20 fréquence critique F_c , le spécialiste peut en déduire la saturation en fluide S_w . Le spécialiste connaît notamment la formule :

$$\tau = \left(\frac{4KF}{D_{(+)}^s} \right) \cdot S_w^2$$

qui permet de déduire la saturation S_w à partir du facteur de formation F , de la perméabilité K (qui peut être connue par ailleurs, à partir de mesures pétrophysiques en laboratoire, de telles
 25 mesures étant bien connues du spécialiste), $D_{(+)}^s$ est le coefficient de diffusion (qui peut être connu par ailleurs, à partir de mesures pétrophysiques en laboratoire par laboratoire, de telles mesures étant bien connues du spécialiste ou alors déterminée par une formule).

Puis, à partir de la saturation en fluide S_w et sachant par ailleurs que l'indice de résistivité
 30 peut aussi s'écrire $I_R = S_w^{-n}$, on en déduit n , l'exposant de saturation de la loi d'Archie. La perméabilité relative peut alors être obtenue selon une formule du type :

$$K_r = C_r \cdot S_w^{n+1}$$

Avantageusement, les mesures décrites ci-dessus peuvent être en sus répétées pour
5 différentes pressions de confinement et /ou différentes températures. Pour ce faire, le dispositif
selon le premier mode principal de mise œuvre du dispositif selon l'invention peut comprendre
une cellule de confinement hydraulique et/ou des moyens de régulation de la température.
Ainsi, l'invention permet de réaliser des mesures de laboratoire pour différentes conditions de
mesures (de pression, de température, de fluide, de saturation respective des fluides). De cette
10 manière, le spécialiste peut par exemple établir un abaque des paramètres pétrophysiques
déterminés en fonction de ces conditions de mesure.

Etape 2

Selon le procédé selon l'invention, on réalise en outre des mesures de potentiel spontané
15 et de polarisation spectrale induite dans le puits considéré au moyen du dispositif selon l'une
quelconque des variantes du deuxième mode principal de mise en œuvre du dispositif selon
l'invention. Ces mesures seront appelées « mesures de puits » par la suite.

Par comparaison des valeurs des mesures réalisées dans le puits avec celles réalisées
en laboratoire, on détermine les paramètres pétrophysiques de la formation étudiée en fonction
20 des paramètres pétrophysiques obtenus par les mesures de laboratoire. Cette détermination
peut revêtir différentes formes : une attribution directe des paramètres obtenus par mesures de
laboratoire (notamment s'il y a parfaite correspondance entre mesures de laboratoire et
mesures diagaphiques), ou bien encore par interpolation de plusieurs paramètres, par
extrapolation, ou encore par application de toute fonction ad hoc. Selon un mode de mise en
25 œuvre de l'invention, on applique une fonction de mise à l'échelle des mesures réalisées en
laboratoire par rapport aux mesures réalisées dans le puits, de façon à tenir compte des
facteurs d'échelle différents entre ces deux types de mesure.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, on applique préalablement une mise à
l'échelle des mesures réalisées en laboratoire par rapport aux mesures réalisées dans le puits,
30 pour tenir compte des conditions de mesure différentes.

Un exemple de variante de mise en œuvre du procédé selon l'invention est présenté en
Figure 4. Ainsi, cette variante comporte deux dispositifs de mesures de puits, un placé dans un
puits d'injection WI et un placé dans un puits de production WP du fluide contenu dans la
formation étudiée, les deux puits étant espacés d'une centaine de mètres. Par exemple, lorsque
35 le fluide injecté est du CO₂, une telle configuration peut permettre d'investiguer les variations de

paramètres pétrophysiques entre les deux puits et ainsi de suivre le front de CO₂ (via la saturation) entre les puits.

Etape 3

5 A partir des paramètres pétrophysiques ainsi déterminés pour la formation étudiée, on peut définir un schéma d'exploitation optimal du fluide contenu dans la formation étudiée, c'est-à-dire un schéma d'exploitation permettant une exploitation optimale d'un fluide considéré suivant des critères technico-économiques prédéfinis par le spécialiste. Il peut s'agir d'un scénario offrant un fort taux de récupération du fluide, sur une longue durée d'exploitation, et
10 nécessitant un nombre de puits limité. Selon un mode de mise en œuvre de l'invention, le schéma d'exploitation optimal peut être défini en déterminant un procédé de récupération du fluide (procédé de récupération primaire, secondaire ou tertiaire), ainsi qu'un nombre, une implantation et une géométrie de puits injecteurs et/ou producteurs permettant de satisfaire des critères technico-économiques prédéfinis. Différents scénarii peuvent être envisagés et leur
15 rentabilité respective approchée à l'aide d'une simulation de réservoir. Le scénario offrant la rentabilité prédite la plus forte pourra par exemple être retenu.

Etape 4

Puis, selon l'invention, on exploite le fluide de la formation étudiée en fonction du schéma
20 d'exploitation déterminé à l'étape 3, satisfaisant le mieux les critères technico-économiques prédéfinis par le spécialiste.

L'exploitation du fluide de la formation étudiée peut alors consister en la réalisation de forages selon le nombre et l'implantation déterminés à l'étape 3, certains de ces puits étant destinés à être des puits injecteurs et d'autres des puits producteurs, à injecter dans les puits
25 injecteurs d'éventuels fluides visant à l'amélioration de la récupération des fluides en place.

Selon un mode de mise en œuvre de l'invention dans lequel les mesures de puits décrites à l'étape 2 sont répétées à différents instants de l'exploitation du fluide de la formation étudiée, les mesures de laboratoire ayant été réalisées préalablement pour diverses conditions de mesures, les paramètres pétrophysiques tels que la perméabilité relative et la saturation en
30 fluide pourront être suivis en temps réel, au fur et à mesure de la production du fluide. Le schéma d'exploitation déterminé à l'étape 3 pourra être alors révisé au fur et à mesure de l'exploitation du fluide de la formation, et la récupération de fluide à l'étape 4 améliorée.

Exemple de réalisation

Les caractéristiques et avantages du procédé selon l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de l'exemple de réalisation ci-après.

5 L'exemple de réalisation en question a été mis en œuvre avec un dispositif selon le premier mode principal de mise en œuvre de l'invention (dispositif de laboratoire) comprenant les éléments suivants :

Matériel de confinement

- 10 • **Une cellule de confinement de type Coreflood** (Vinci Technologies, France) : il s'agit d'une cellule de confinement à piston réglable, avec trois entrées sur une spirale d'injection, trois sorties sur une spirale de sortie, et transparente aux rayons X. Une telle cellule peut permettre de réaliser des mesures jusqu'à une pression de confinement hydraulique de 50 bar en Marcol. Ce dernier assure l'isolation électrique des contacts.
- 15 • **Une gaine thermorétractable en Viton ® (Hellermann-Tyton, France)** munie de 12 piquages répartis le long de la génératrice de la gaine et permettant d'introduire les contacts électriques (2 piquages diamétralement opposés par prise de mesure électrique).

Matériel de mesure et de régulation (P, T, débit)

- 20 • **Une pompe ISCO** de type 260 D, munie d'un capteur de pression déporté, régule la pression hydraulique du confinement jusqu'à 50 bar au plus près de la cellule et absorbe les fluctuations de pression liées à la température.
- **Une pompe d'injection liquide** de type P920 Amersham/Bioscience couvre une gamme de débit de 0.00 à 20.00 mL/min, et sert à l'injection de la saumure dans le milieu poreux.
- 25 • **Une pompe d'injection liquide** de type Pharmacia P500 de gamme 1-499 mL/h sert pour l'appoint du volume du système suite aux échantillonnages et à la recirculation de la saumure sur la face arrière du milieu poreux, afin de maintenir le contact capillaire et la pression capillaire nulle en sortie.
- 30 Un système des 3 vannes de sorties permet de purger les volumes morts de la cellule en saumure et d'améliorer la détermination du volume poreux.
- **Deux capteurs de pression** Keller PAA-33X (0-30 bar), mesurent la pression relative en amont et en aval du montage. Ils permettent aussi le contrôle de la pression d'injection en tête du milieu poreux et l'ajustement de la pression de pore. De plus, le
- 35 capteur aval permet d'équilibrer la pression de la boucle d'échantillonnage avec la pression de pore suite à un prélèvement, de manière à ne pas déstabiliser la pression de pore du système.

- **Un capteur de pression Keller PD39X**, mesure la pression différentielle générée par l'écoulement dans le milieu poreux.
- **Un régulateur de pression gaz Bronhkorst**, type P702CV (Bronhkorst, France), permet de contrôler la pression de pore jusqu'à 20 bar, par la régulation de pression de la fraction gaz contenue dans le séparateur.
- **Un régulateur de débit gaz** de type Bronkorst F-201-CV (Bronhkorst, France), étalonné en N_2 et en CO_2 , couvre une gamme de débits normalisés en pression et en température (P_{atm} et $0^\circ C$) de 1 à 310 mLn/min. Il sert à injecter le gaz en entrée du milieu poreux et permet de réguler le débit jusqu'à une pression de 20 bar.
- **Une sonde température PT100** mesure la température de la saumure entrant dans le milieu poreux. Elle permet de corriger la viscosité de la saumure, la densité et les résistances mesurées par la loi d'Arps.
- **Un séparateur diphasique saumure / gaz** : placé en aval de la cellule, il permet de réinjecter la saumure collectée ayant déjà traversée le milieu poreux. Il permet également de mesurer les variations de volume issues du milieu poreux lors de l'expérience Kr.

Matériel de mesures de résistivité électrique et de potentiel spontané

- **Un Solartron Si1260** : il s'agit d'un impédance/Gain-Phase analyseur, permettant des mesures de résistance et de déphasage (R, X) en balayage fréquence sur une gamme de 1 mHz à 32 MHz, par pas réglables. Les mesures sont réalisées avec le générateur réglé à 1 Volt alternatif. Le couplage avec le **multiplexeur Agilent** permet de travailler en mesure avec 2 ou 4 électrodes.
Le Solartron permet également d'injecter une tension continue de 0 à +/- 40 Volt pour calculer le coefficient d'électro-osmose du système.
- **Un système d'acquisition Agilent 34970A** muni d'une carte de multiplexage permet l'acquisition des potentiels entre les sections sélectionnées du milieu poreux.
- **Une centrale d'acquisition** récupère l'ensemble des mesures réalisées sur un PC, via le système d'acquisition Labview.
- **4 électrodes** impolarisables disposées tel que présenté en Figure 2.

Protocole expérimental

Préparation et caractéristiques de l'échantillon

- Le milieu poreux est issu d'un bloc de carrière référencée. Il est carotté en diamètre 40 mm et scié avec la scie à face parallèle, sous eau. Les échantillons sont séchés à l'étuve à

60°C. L'échantillon est pesé à sec. Les caractéristiques géométriques de l'échantillon d'expérimentation sont déterminées au pied à coulisse : diamètre et longueur. L'échantillon est photographié et référencé.

5 Mise en place de l'échantillon dans la cellule

L'échantillon est monté dans la gaine Viton, les électrodes sont connectées et les contacts vérifiés grâce à un multimètre. L'échantillon et sa gaine sont montés dans la cellule et mis sous confinement hydraulique de Marcol, à la pression de confinement choisie (30 bar). La pression de confinement est au moins supérieure de 15 bar par rapport à la pression de pore choisie pour l'expérience.

L'échantillon est ensuite mis sous vide primaire. Une saumure, de concentration choisie est réalisée (ici 10 g/L de NaCl), sa conductivité est mesurée. L'échantillon est saturé avec la saumure, à la pression de pore choisie pour l'expérience, à l'aide d'une pompe Isco en régulation de pression.

15

Mesures réalisées

Les mesures suivantes sont réalisées :

- 1- Des mesures successives de potentiel spontané au niveau de chaque tranche de l'échantillon, couplées aux variations de dP (induites par une variation de débit) jusqu'à ce que le système soit à un pseudo-équilibre (c'est-à-dire jusqu'à ce que les potentiels spontanés PS se stabilisent). Cette mesure permet de déterminer le coefficient de couplage électrocinétique.
- 2- Des mesures par polarisation spectrale induite en balayage fréquentiel, à l'état 100% saturé en saumure et sous le débit d'expérimentation, avec 4 électrodes (2 d'injection et 2 de mesure), à 1 volt, sur la gamme allant de 1 mHz à 30 MHz. Cette mesure permet la mesure de l'indice de résistivité (IR) lorsque la mesure est répétée à différents états de saturation.
- 3- Des mesures par polarisation spectrale induite en balayage fréquentiel, à l'état 100% saturé en saumure et sous le débit d'expérimentation, avec 4 électrodes, à 1 volt sur la gamme allant de 1 mHz à 30 MHz. Le but de cette opération est d'obtenir un angle de phase (déphasage entre les « R » et les « X »), un temps de relaxation, ainsi qu'une fréquence critique pour chaque section analysée.
- 4- Des mesures de gradients de pression, en entrée et sortie de l'échantillon ;
- 5- Des mesures par potentiels induits, dans une gamme allant de 0 à +/- 40 Volt, sont effectuées sur l'ensemble du milieu poreux et provoquent des variations de dP. Ce type de mesure permet de déterminer le coefficient d'électro-osmose.

Les 4 premières étapes précédentes ont été réalisées pour différentes saturations en fluide (étapes de drainage/imbibition).

L'ensemble des mesures réalisées selon le protocole expérimental défini ci-dessous permettent de tracer des courbes de variations des mesures réalisées en fonction des conditions de mesure. Des exemples de telles courbes, appelées aussi abaques sont présentées en Figures 5 à 7.

Ainsi, la Figure 5 présente les courbes de variations de la différence de potentiel électrique dV en fonction de la variation de pression fluide dP pour des échantillons de type calcaire de Brauvilliers (ronds blancs), calcaire de Saint-Emilion (carrés noirs), et dolomites LS2 (croix). A partir des pentes de ces courbes, on en déduit respectivement le coefficient de couplage électrocinétique (en milieu saturé dans le cas présent), et ce pour chacun des échantillons considérés.

La Figure 6 présente l'évolution du coefficient de couplage électrocinétique relatif Cr en fonction de la saturation en fluide S_w , dans le cas du calcaire de Brauvilliers, et pour différentes positions des électrodes, les positions des électrodes ABCD étant présentées en Figure 2.

La Figure 7 présente l'évolution de l'angle de phase P de la résistivité électrique complexe en fonction de la fréquence F dans le cas du calcaire de Brauvilliers, et ce pour différentes saturations en saumure S_w (entre 27% et 100%, l'augmentation des valeurs de saturation étant matérialisée par une flèche dans la Figure 7). Comme indiqué en Figure 7, on peut en déduire, pour chaque condition de saturation S_w , une valeur de l'angle de phase θ (ordonnée du premier pic formé par la courbe), un temps de relaxation τ (abscisse du premier pic formé par la courbe de mesure) et une fréquence critique F_c (abscisse du premier creux formé par la courbe de mesure).

Ainsi de telles courbes, obtenues notamment par des mesures à la fois de type PS et PSI, pour différents échantillons représentatifs de la formation étudiée et pour différentes conditions de mesures, constituent des abaques, qui permettent au spécialiste, ayant en sus, à sa disposition, selon le procédé selon l'invention, des mesures électriques de même type (c'est-à-dire de type PS et PSI) réalisées dans le puits, de faire des correspondances, entre les valeurs des mesures de puits et les valeurs des mesures de laboratoire, et d'en déduire les paramètres pétrophysiques in situ, tels que la perméabilité relative et la saturation en fluide. Ces paramètres pétrophysiques sont particulièrement utiles au spécialiste pour définir un schéma d'exploitation optimale de la formation étudiée.

REVENDICATIONS

- 5 1. Dispositif pour la détermination de paramètres pétrophysiques d'une portion d'une formation souterraine comprenant un fluide, caractérisé en ce que ledit dispositif comprend :
- au moins deux électrodes (EL) ;
 - un moyen d'émission d'un courant électrique variable en fréquences (MEC) et un
10 moyen de mesure de la résistivité électrique en amplitude et en phase (MRE), deux desdites électrodes (EL) coopérant avec ledit moyen d'émission (MEC) et au moins deux desdites électrodes (EL) coopérant avec ledit moyen de mesure de la résistivité (MRE) ;
 - un moyen de mesure d'une différence de potentiel électrique (MDP) coopérant avec
15 au moins deux desdites électrodes (EL) ;
 - un moyen d'automatisation (AUT) des mesures réalisées par lesdits moyens de mesure, et/ou un moyen de collecte desdites mesures et/ou un moyen d'analyse desdites mesures.
- 20 2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel lesdites fréquences sont comprises dans une gamme de fréquences dont la borne inférieure est comprise entre 1 et 20 mHz, et la borne supérieure est comprise entre 28 et 32 MHz.
- 25 3. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, dans lequel lesdites électrodes (EL) sont en matériau métallique impolarisable.
4. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le nombre desdites électrodes (EL) est compris entre 4 et 8, de préférence 6.
- 30 5. Dispositif selon l'une des revendications précédentes, dans lequel une partie des électrodes (EL) sont distribuées sur une longueur d'un support formé d'un matériau isolant.

6. Dispositif selon la revendication 5, dans lequel ledit dispositif est destiné à des mesures de laboratoire et dans lequel ladite portion de ladite formation est un échantillon de ladite formation, par exemple prélevé par carottage, caractérisé en ce que :

- ledit support (SU) est un manchon souple de forme sensiblement cylindrique destiné à recevoir ledit échantillon ;
- lesdites électrodes (EL) sont au moins au nombre de quatre et deux desdites électrodes (EL) sont placées de manière à être en contact avec chacune des sections libres dudit échantillon ;
- ladite longueur dudit support (SU) est orientée selon l'axe de révolution dudit support.

7. Dispositif selon la revendication 6, dans lequel ledit manchon est une gaine thermo-rétractable et au moins deux desdites électrodes (EL) sont piquées sur ladite gaine, de manière à traverser ladite gaine.

8. Dispositif selon l'une des revendications 6 à 7, dans lequel ledit dispositif comprend en outre des moyens pour injecter un fluide de travail dans ledit échantillon et pour réguler le débit dudit fluide de travail, et un moyen de mesure de la pression fluide en au moins deux endroits dudit échantillon.

9. Dispositif selon l'une des revendications 6 à 8, dans lequel ledit dispositif comprend en outre une cellule de confinement hydraulique et/ou des moyens de régulation de la température.

10. Dispositif selon l'une des revendications 6 à 9, comprenant en outre des moyens de mesures géochimiques tels que des moyens de mesure de l'alcalinité, de la conductivité, des teneurs en cations-anions majeurs, des teneurs en éléments traces, de la teneur en gaz dissous après prélèvement.

11. Dispositif selon la revendication 5, dans lequel ledit dispositif est destiné à des mesures au sein d'au moins un puits foré dans ladite formation telles que des mesures diagraphiques, ladite portion de ladite formation étant une zone entourant ledit puits dans lequel est inséré ledit dispositif, caractérisé en ce que ledit support est de forme sensiblement cylindrique, et en ce que lesdites électrodes (EL) sont des anneaux de

diamètre légèrement supérieur au diamètre dudit support (SU) et sont distribuées le long de l'axe de révolution dudit cylindre.

12. Dispositif selon la revendication 11, dans lequel lesdits moyens de mesures de la
résistivité (MRE), lesdits moyens de mesure de différence de potentiel électrique (MDP),
lesdits moyens d'émission d'un courant électrique (MEC) sont destinés à être placés à la
surface de ladite formation et coopèrent avec lesdites électrodes (EL) par des moyens
de connexion résistants aux conditions de pression et de température inhérentes à des
mesures dans des puits.

13. Procédé d'exploitation d'une formation souterraine comportant un fluide, caractérisé en
ce que, à partir d'au moins un échantillon de ladite formation, ladite formation étant
traversée par au moins un puits :

- i. pour au moins une condition de mesure, on réalise au moins des mesures de
potentiel spontané et de polarisation spectrale induite sur ledit échantillon au
moyen du dispositif selon l'une des revendications 8 à 10, et on détermine
des paramètres pétrophysiques représentatifs dudit échantillon ;
- ii. on réalise des mesures de potentiel spontané et de polarisation spectrale
induite dans ledit puits au moyen d'au moins un dispositif selon l'une des
revendications 11 à 12 ;
- iii. on calibre lesdites mesures réalisées dans ledit puits à l'aide desdites
mesures réalisées sur ledit échantillon et on déduit des paramètres
pétrophysiques représentatifs de ladite formation ;
- iv. à partir desdits paramètres pétrophysiques représentatifs de ladite formation,
on définit un schéma d'exploitation optimal de ladite formation et on exploite
ladite formation à partir dudit schéma.

14. Procédé selon la revendication 13, dans lequel, au cours de l'étape i), on mesure :

- a. un gradient de pression induit dans ledit échantillon, au moyen dudit moyen de
mesure de la pression du fluide ;
- b. une différence de potentiel électrique induit dans ledit échantillon, au moyen dudit
moyen de mesure d'une différence de potentiel électrique ;
- c. une polarisation spectrale induite au sein dudit échantillon, au moyen dudit
moyen de mesure de la polarisation spectrale induite ;

et on répète lesdites mesures a), b) et c) pour différents débits de fluide et pour différentes saturations en fluide.

5 15. Procédé selon la revendication 14, dans lequel lesdites mesures a), b) et c) sont répétées pour différentes pressions de confinement et /ou différentes températures.

10 16. Procédé selon l'une des revendications 13 à 15, dans lequel lesdits paramètres pétrophysiques représentatifs de ladite formation et/ou dudit échantillon sont la perméabilité relative et/ou la saturation.

17. Procédé selon l'une des revendications 13 à 16, dans lequel l'étape ii) est répétée au fur et à mesure de l'exploitation de ladite formation.

15

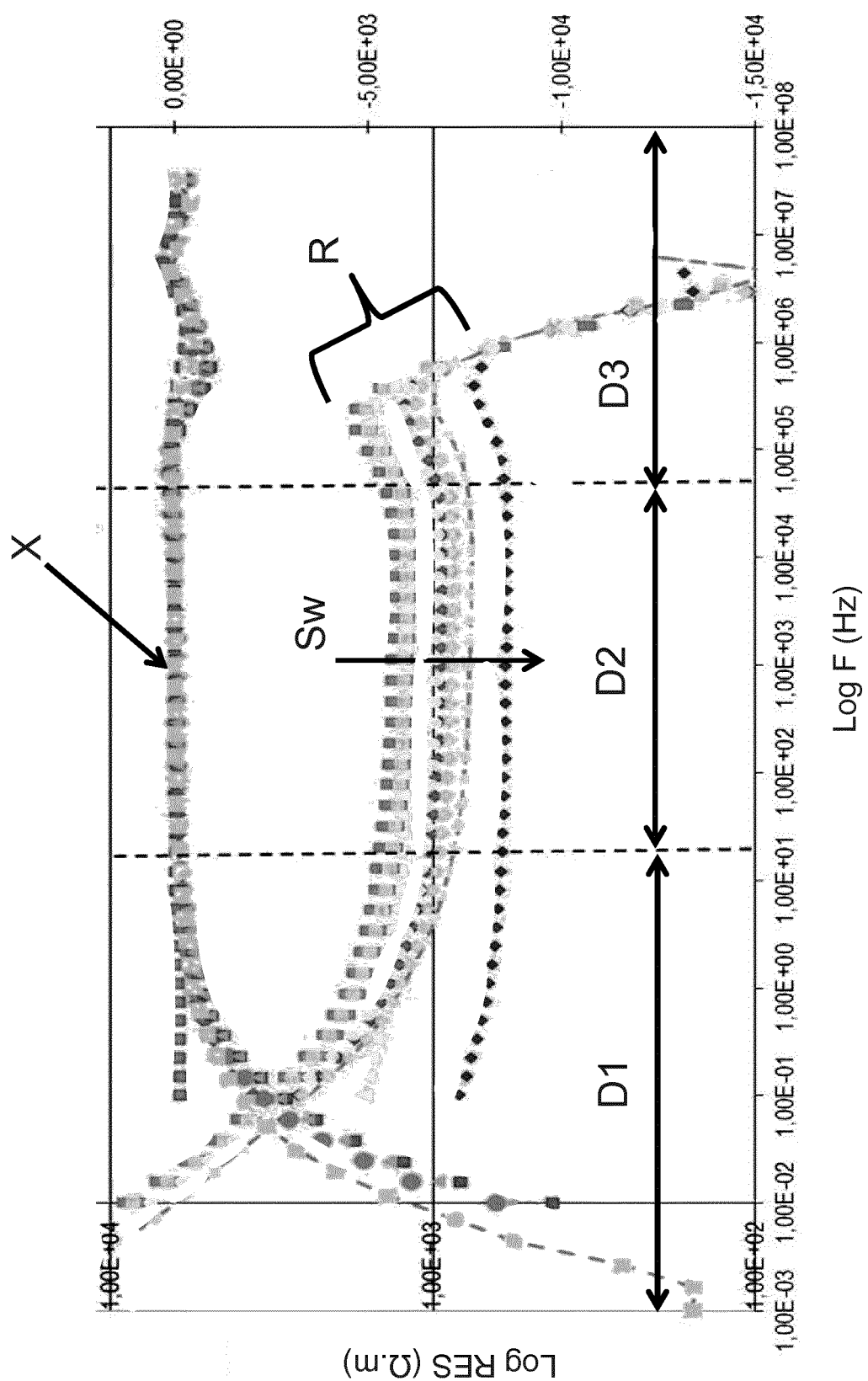


Fig. 1

2/4

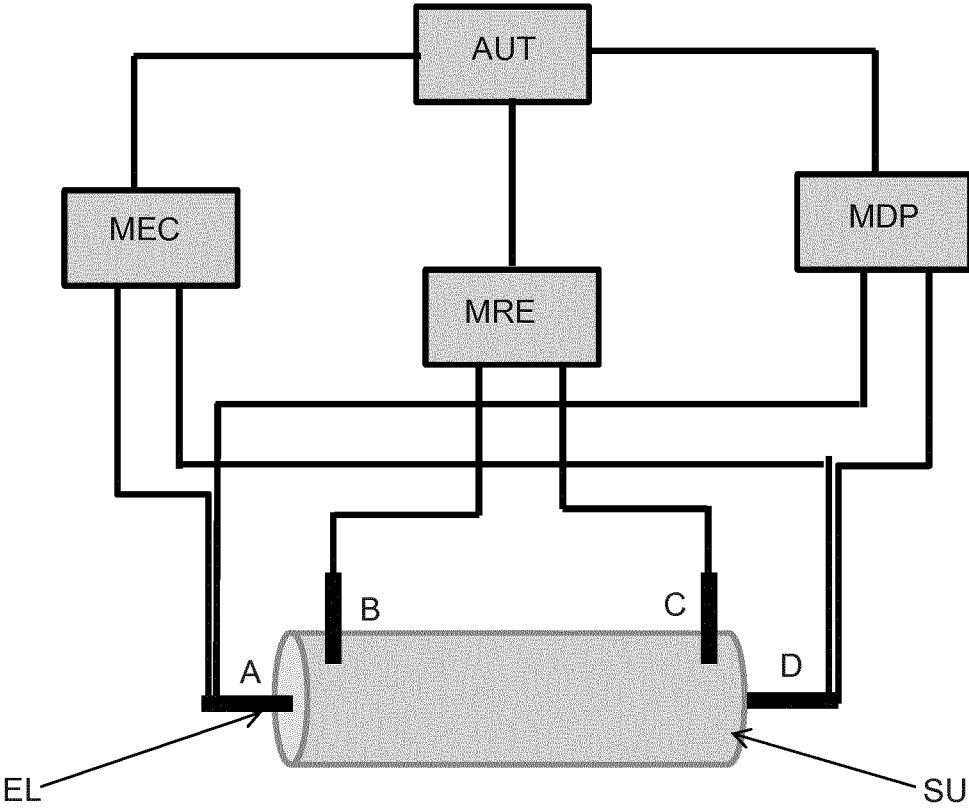


Fig. 2

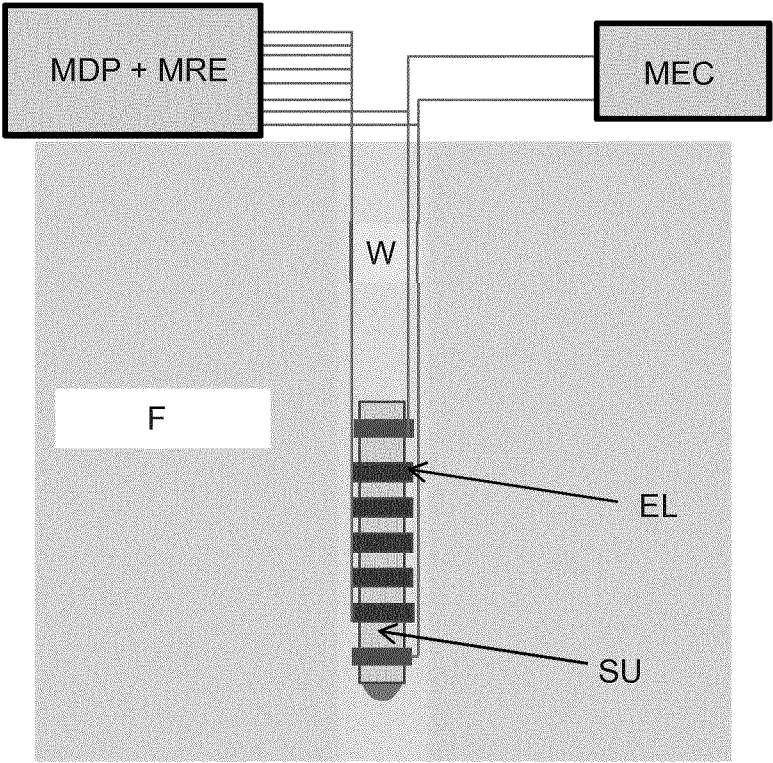


Fig. 3

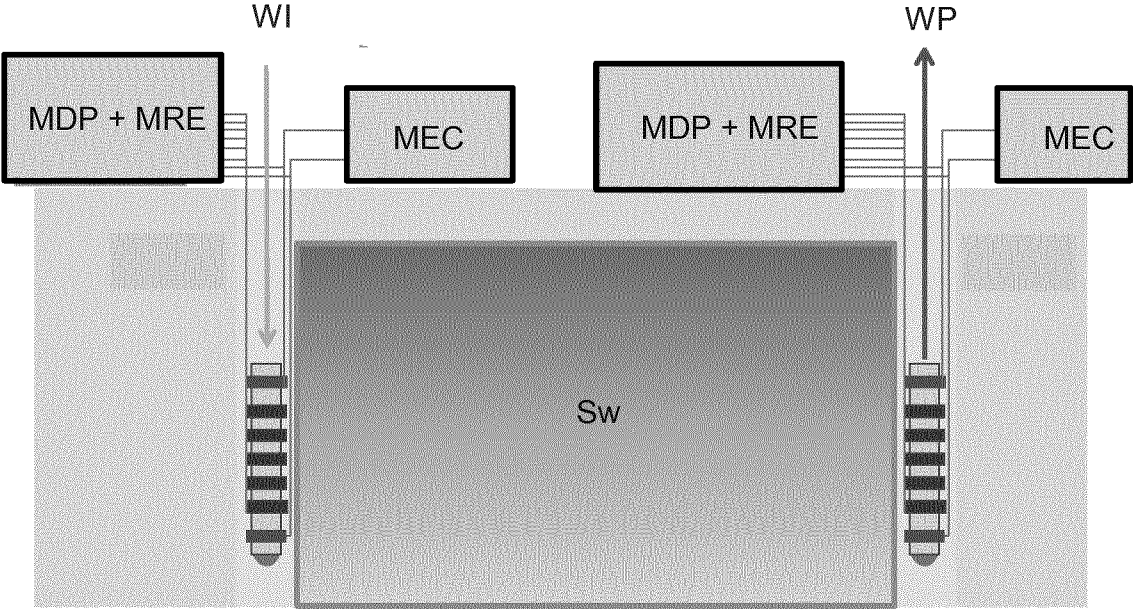


Fig. 4

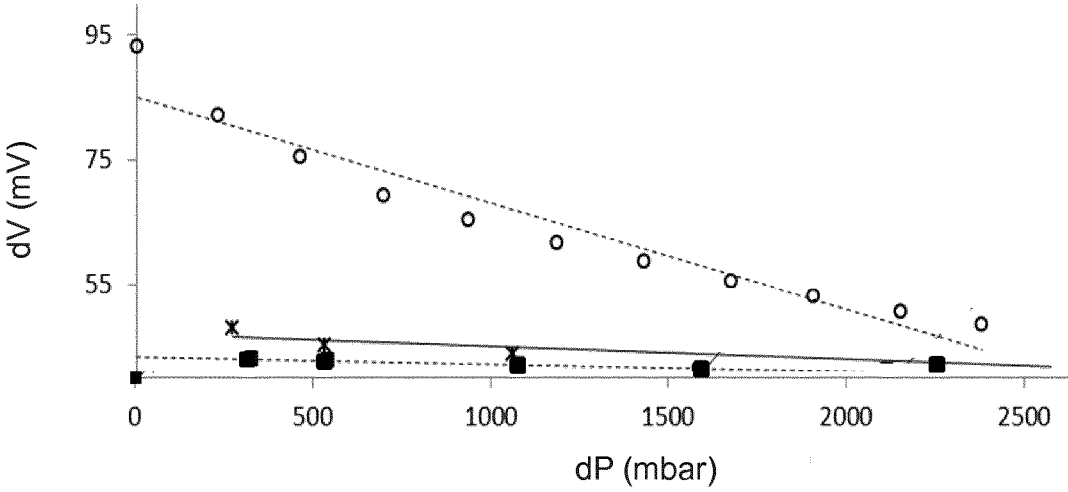


Fig. 5

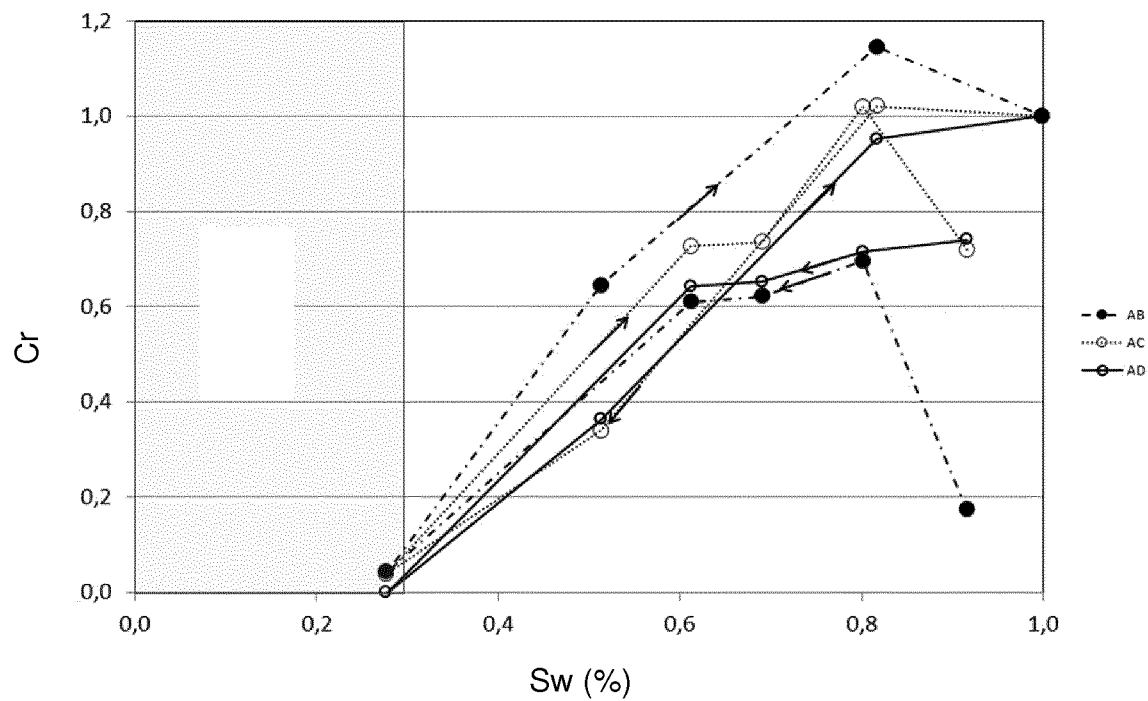
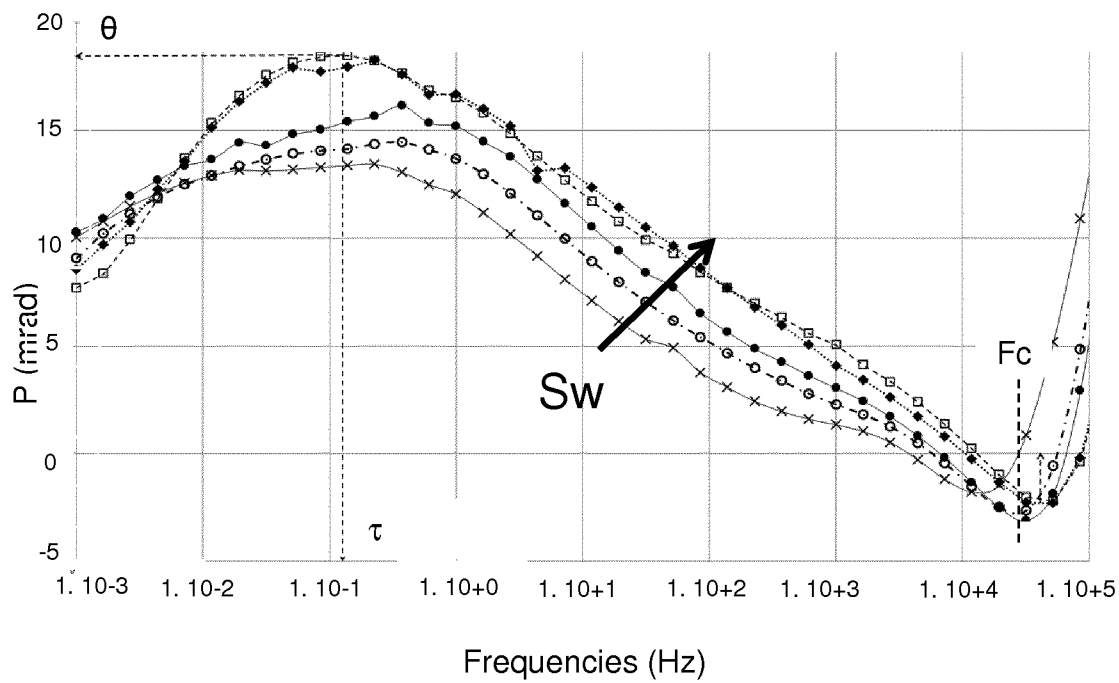


Fig. 6



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/055695

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01N27/02 G01V3/26 G01N33/28
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01N G01V

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 7 388 381 B1 (WERKEMA JR DOUGLAS D [US]) 17 June 2008 (2008-06-17)	1-5, 11, 12
Y	column 1, lines 50-66 column 43, lines 41-64 column 6, lines 2-9	6-10, 13-17
X	----- HUANG ZHEN ET AL: "A Novel Design of Master Control System for Induced Polarization Logging Instrument", ELECTRICAL AND CONTROL ENGINEERING (ICECE), 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 25 June 2010 (2010-06-25), pages 183-186, XP031796359, ISBN: 978-1-4244-6880-5 page 183, column 1, paragraph 2 page 184, column 1, paragraph 3 ----- -/-	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

4 May 2017

Date of mailing of the international search report

12/05/2017

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Stussi, Elisa

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/055695

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	A. REVIL ET AL: "Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology", HYDROGEOLOGY JOURNAL, vol. 20, no. 4, 10 February 2012 (2012-02-10), pages 617-658, XP055203095, ISSN: 1431-2174, DOI: 10.1007/s10040-011-0819-x "Concluding statements"; page 35	1
X	----- HAMIDREZA RAMAZI ET AL: "Application of integrated geoelectrical methods in Marand (Iran) manganese deposit exploration", ARABIAN JOURNAL OF GEOSCIENCES, vol. 6, no. 8, 28 February 2012 (2012-02-28), pages 2961-2970, XP055325856, Berlin/Heidelberg ISSN: 1866-7511, DOI: 10.1007/s12517-012-0537-2 abstract	1
Y	----- Lech Rusiniak: "Spontaneous polarization of water in porous structure of a solid body", Geophysical Journal International, 1 February 2002 (2002-02-01), pages 313-319, XP055325798, Oxford, UK DOI: 10.1046/j.0956-540x.2001.01587.x Retrieved from the Internet: URL:https://gji.oxfordjournals.org/content/148/2/313.full.pdf#page=1&view=FitH the whole document	6-10, 13-17
Y	----- Johnmary Kiberu: "Induced polarization and Resistivity measurements on a suite of near surface soil samples and their empirical relationship to selected measured engineering parameters", 1 March 2002 (2002-03-01), XP055325843, Retrieved from the Internet: URL:https://www.itc.nl/library/Papers/msc_2002/ereg/kiberu.pdf [retrieved on 2016-12-05] paragraphs [3.5.1], [3.5.2], [3.5.3], [05.2], [05.3], [05.6], [05.7]; table 6.2 ----- -/--	6-10, 13-17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/055695

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4 658 215 A (VINEGAR HAROLD J [US] ET AL) 14 April 1987 (1987-04-14) columns 3-6; figure 1 -----	1-17
A	US 4 730 162 A (VINEGAR HAROLD J [US] ET AL) 8 March 1988 (1988-03-08) columns 5,6; figure 1 -----	1-17
A	V S SARMA: "Electrical Resistivity(ER), Self Potential (SP), Induced Polarisation (IP), Spectral Induced Polarisation (SIP) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) prospection in NGRI for the past 50 years-A Brief Review", J. IND. GEOPHYS. UNION, vol. 18, no. 2, 1 April 2014 (2014-04-01), pages 245-272, XP055325790, the whole document -----	1-17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2017/055695

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 7388381	B1	17-06-2008	NONE
US 4658215	A	14-04-1987	NONE
US 4730162	A	08-03-1988	CA 1253567 A 02-05-1989
		EP 0229424 A2 22-07-1987	
		JP S62159083 A 15-07-1987	
		NO 865317 A 01-07-1987	
		US 4730162 A 08-03-1988	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2017/055695

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G01N27/02 G01V3/26 G01N33/28 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G01N G01V		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data, COMPENDEX, INSPEC		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 7 388 381 B1 (WERKEMA JR DOUGLAS D [US]) 17 juin 2008 (2008-06-17)	1-5, 11, 12
Y	colonne 1, lignes 50-66 colonne 43, lignes 41-64 colonne 6, lignes 2-9	6-10, 13-17
X	----- HUANG ZHEN ET AL: "A Novel Design of Master Control Syetem for Induced Polarization Logging Instrument", ELECTRICAL AND CONTROL ENGINEERING (ICECE), 2010 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 25 juin 2010 (2010-06-25), pages 183-186, XP031796359, ISBN: 978-1-4244-6880-5 page 183, colonne 1, alinéa 2 page 184, colonne 1, alinéa 3 ----- -/-	1
☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents ☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets	
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale	
4 mai 2017	12/05/2017	
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Stussi, Elisa

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	A. REVIL ET AL: "Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology", HYDROGEOLOGY JOURNAL, vol. 20, no. 4, 10 février 2012 (2012-02-10), pages 617-658, XP055203095, ISSN: 1431-2174, DOI: 10.1007/s10040-011-0819-x "Concluding statements"; page 35	1
X	----- HAMIDREZA RAMAZI ET AL: "Application of integrated geoelectrical methods in Marand (Iran) manganese deposit exploration", ARABIAN JOURNAL OF GEOSCIENCES, vol. 6, no. 8, 28 février 2012 (2012-02-28), pages 2961-2970, XP055325856, Berlin/Heidelberg ISSN: 1866-7511, DOI: 10.1007/s12517-012-0537-2 abrégé	1
Y	----- Lech Rusiniak: "Spontaneous polarization of water in porous structure of a solid body", Geophysical Journal International, 1 février 2002 (2002-02-01), pages 313-319, XP055325798, Oxford, UK DOI: 10.1046/j.0956-540x.2001.01587.x Extrait de l'Internet: URL:https://gji.oxfordjournals.org/content/148/2/313.full.pdf#page=1&view=FitH le document en entier	6-10, 13-17
Y	----- Johnmary Kiberu: "Induced polarization and Resistivity measurements on a suite of near surface soil samples and their empirical relationship to selected measured engineering parameters", 1 mars 2002 (2002-03-01), XP055325843, Extrait de l'Internet: URL:https://www.itc.nl/library/Papers/msc_2002/ereg/kiberu.pdf [extrait le 2016-12-05] alinéas [3.5.1], [3.5.2], [3.5.3], [05.2], [05.3], [05.6], [05.7]; tableau 6.2	6-10, 13-17
	----- -/--	

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 4 658 215 A (VINEGAR HAROLD J [US] ET AL) 14 avril 1987 (1987-04-14) colonnes 3-6; figure 1 -----	1-17
A	US 4 730 162 A (VINEGAR HAROLD J [US] ET AL) 8 mars 1988 (1988-03-08) colonnes 5,6; figure 1 -----	1-17
A	V S SARMA: "Electrical Resistivity(ER), Self Potential (SP), Induced Polarisation (IP), Spectral Induced Polarisation (SIP) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) prospection in NGRI for the past 50 years-A Brief Review", J. IND. GEOPHYS. UNION, vol. 18, no. 2, 1 avril 2014 (2014-04-01), pages 245-272, XP055325790, le document en entier -----	1-17

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2017/055695

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 7388381	B1	17-06-2008	AUCUN
US 4658215	A	14-04-1987	AUCUN
US 4730162	A	08-03-1988	CA 1253567 A 02-05-1989
		EP 0229424 A2 22-07-1987	
		JP S62159083 A 15-07-1987	
		NO 865317 A 01-07-1987	
		US 4730162 A 08-03-1988	