

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① N° de publication : **3 036 518**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②① N° d'enregistrement national : **15 54515**

⑤① Int Cl⁸ : **G 06 F 19/00** (2017.01), G 01 V 1/32, E 21 B 43/00

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ INVERSION POUR CONTRAINTE TECTONIQUE.

②② Date de dépôt : 20.05.15.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 25.11.16 Bulletin 16/47.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 06.07.18 Bulletin 18/27.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥① Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : SERVICES PETROLIERS
SCHLUMBERGER — FR.

⑦② Inventeur(s) : LEJRI MUSTAPHA, MAERTEN
LAURENT et MAERTEN FRANTZ.

⑦③ Titulaire(s) : SERVICES PETROLIERS
SCHLUMBERGER.

⑦④ Mandataire(s) : CABINET OSHA ET ASSOCIES.

FR 3 036 518 - B1



INVERSION POUR CONTRAINTE TECTONIQUE

CONTEXTE

[0001] Les paléocontraintes se rapportent à des contraintes qui sont intervenues dans le passé géologique (c.-à-d. il y a des milliers ou des millions d'années). L'analyse des paléocontraintes peut comprendre l'opération consistant à déduire les directions selon lesquelles la contrainte s'est exercée et a donné lieu à une caractéristique structurelle dans un environnement géologique. Des variations dans les champs de contraintes au sein de la croûte terrestre peuvent avoir pour résultat une variété de réactions mécaniques, que l'on peut classer en fonction de l'échelle. Par exemple, pensez à une échelle microscopique (par ex. déformation cristalline, comprenant maclage, dissolution par pression, micro-fractures, inclusions fluides alignées, etc.) ou macroscopique (par ex. plissement, fracturation, formation de failles, etc.). À titre d'exemple, on peut cataloguer une déformation (par ex., plissement ou fracturation) sans dissolution comme tension mécanique. La tension tant macroscopique que microscopique peut être élastique et exister tant qu'existe une contrainte différentielle ou elle peut être inélastique en ce que la déformation due à un évènement particulier de contrainte subsiste même après que la contrainte a été éliminée. Dans le dernier cas, déformation inélastique, le champ de contraintes responsable de la déformation, si on peut l'inférer, est alors la paléocontrainte. À titre d'exemple, ANDERSON ou l'analyse andersonienne peut estimer l'état de contrainte provenant de failles (par ex., selon la théorie de formation de failles d'ANDERSON). Toutefois, des preuves provenant d'environnements géologiques démontrent que certaines caractéristiques (par ex., failles d'effondrement obliques, etc.) peuvent être incompatibles avec la théorie d'ANDERSON. Pour gérer de tels environnements, on peut employer une technique telle qu'une technique d'inversion où, par exemple, les paléocontraintes sont déduites des informations sur les failles géologiques.

RÉSUMÉ

[0002] Un procédé peut comprendre une réception de données pour des fractures associées à un environnement géologique, une mise en œuvre d'une inversion de contrainte, basée au moins partiellement sur une partie des données et d'une attribution de différents types de fracture mécanique à différentes populations de fractures, pour obtenir la contrainte tectonique et une production en sortie de la contrainte tectonique.

Un système peut comprendre un processeur ; une mémoire ; et un ou plusieurs modules stockés dans la mémoire, dans lequel lesdits modules comprennent des instructions exécutables par processeur pour donner des instructions au système dans lequel les instructions comprennent des instructions pour recevoir des données pour des fractures associées à un environnement géologique ; effectuer une inversion de contrainte, basée au moins partiellement sur une partie des données et une attribution de différents types de fracture mécanique à différentes populations de fractures, pour obtenir la contrainte tectonique ; et produire en sortie la contrainte tectonique. Un ou plusieurs supports de stockage lisibles par ordinateur peuvent comprendre des instructions exécutables par processeur pour donner des instructions au système dans lequel les instructions comprennent des instructions pour recevoir des données pour des fractures associées à un environnement géologique ; effectuer une inversion de contrainte, basée au moins partiellement sur une partie des données et l'attribution de différents types de fracture mécanique à différentes populations de fractures, pour obtenir la contrainte tectonique ; et produire en sortie la contrainte tectonique. Divers autres appareils, systèmes, procédés, etc., sont également décrits.

[0003] Ce résumé est fourni pour présenter une sélection de concepts qui sont décrits plus en détail ci-dessous dans la description détaillée. Ce résumé ne vise pas à identifier des caractéristiques clés ou essentielles du sujet revendiqué, pas plus qu'il n'a pour vocation de servir d'aide dans la limitation de la portée du sujet revendiqué.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

[0004] Les caractéristiques et avantages des modes de réalisation décrits peuvent être plus aisément compris si l'on se réfère à la description qui suit, combinée avec les dessins ci-joints.

[0005] La Figure 1 illustre un exemple de système qui comprend divers composants pour simuler un environnement géologique ;

[0006] La Figure 2 illustre un exemple de bassin sédimentaire, un exemple de procédé, un exemple de formation, un exemple de puit de forage, un exemple d'outil de forage, un exemple de convention et un exemple de système ;

[0007] La Figure 3 illustre des exemples de régimes tectoniques ;

[0008] La Figure 4 illustre des exemples de caractéristiques et de contraintes associées ;

[0009] La Figure 5 illustre un exemple de partie d'un environnement géologique et de diverses caractéristiques ;

[0010] La Figure 6 illustre un exemple de représentation graphique et de contraintes associées ;

5 **[0011]** La Figure 7 illustre un exemple de procédé ;

[0012] La Figure 8 illustre un exemple de représentation graphique dans un domaine tectonique ;

[0013] La Figure 9 illustre un exemple de tableau et un exemple de représentation graphique d'un modèle synthétique ;

10 **[0014]** La Figure 10 illustre un exemple de représentation graphique dans un domaine tectonique ;

[0015] La Figure 11 illustre un exemple de représentation graphique dans un domaine tectonique ;

15 **[0016]** La Figure 12 illustre un exemple de représentation graphique dans un domaine tectonique ;

[0017] La Figure 13 illustre des exemples de représentation graphique dans un domaine tectonique ;

[0018] La Figure 14 illustre des exemples de représentation graphique dans un domaine tectonique ;

20 **[0019]** La Figure 15 illustre un exemple de modèle d'éléments finis de frontière ;
et

[0020] La Figure 16 illustre des exemples de composants d'un système et d'un système en réseau.

25 DESCRIPTION DÉTAILLÉE

[0021] La description qui suit comprend le meilleur mode actuellement envisagé pour mettre en pratique les réalisations décrites. Cette description ne doit pas être prise dans un sens limitatif, mais est plutôt faite simplement dans le but de décrire les principes généraux des mises en œuvre. Il faut s'assurer de la portée des modes de réalisation décrits en se reportant aux revendications émises.

30

[0022] On peut modéliser les formations souterraines et les phénomènes physiques connexes au moyen de diverses techniques. De telles techniques peuvent comporter le maillage, ou autre discrétisation, d'un ou plusieurs volumes souterrains qui constituent une formation. À titre d'exemple, un processus peut comprendre l'exécution

d'une inversion de contrainte via un modèle de géomécanique. Là où une formation comprend un ou plusieurs fluides (par ex., un gaz, un liquide ou les deux), une technique de modélisation peut comprendre la formulation d'équations qui représentent des phénomènes physiques tels que la pression, la saturation et la composition.

5 **[0023]** À titre d'exemple, une infrastructure de géomécanique peut comprendre un ou plusieurs modules qui comprennent des instructions exécutables par processeur. À titre d'exemple, une telle infrastructure peut comprendre des instructions pour mettre en œuvre la méthode des éléments finis de frontière (BEM, Boundary Element Method) où des surfaces dans l'espace sont décrites au moins en partie par des éléments finis de
10 frontière. À titre d'exemple, une telle infrastructure peut comprendre des équations qui peuvent décrire des dislocations angulaires, par exemple, pour modéliser des champs de contraintes tridimensionnels. À titre d'exemple, un modèle peut prévoir la modélisation de discontinuités dans un espace infini ou semi-infini élastique, hétérogène et isotrope.

15 **[0024]** À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la modélisation d'un champ pétrolifère et gazéifère qui couvre un volume se mesurant, par exemple, en kilomètres. Un modèle d'un tel champ peut comprendre des milliers de mailles ou de points de grille, où chaque maille ou point de grille peut comprendre des valeurs associées, qui peuvent être des inconnues d'équation, par exemple, facultativement par rapport au temps. Étant
20 donné des valeurs initiales (par ex., des conditions initiales) et des valeurs de frontière (par ex., des conditions de frontière), on peut appliquer une technique de solution itérative pour déterminer les inconnues d'équation en un ou plusieurs points dans le temps (par ex., régime permanent ou transitoire).

[0025] Comme mentionné, on peut appliquer un procédé comme partie d'une
25 infrastructure. Par exemple, une infrastructure peut comprendre des fonctionnalités pour modéliser un environnement géologique. À titre d'exemple, on peut effectuer une interprétation sismique en utilisant un logiciel « de la sismique à la simulation » (« seismic to simulation ») tels que l'infrastructure « de la sismique à la simulation » PETREL® (SCHLUMBERGER Limited, HOUSTON, Texas), par exemple, comme partie d'un flux
30 de traitement pour bâtir un modèle. Même si on a cité l'infrastructure « de la sismique à la simulation » PETREL®, on peut employer d'autres types de logiciels, infrastructures, etc. dans le but de bâtir un modèle. À titre d'exemple, on peut mettre en œuvre une infrastructure tel que l'infrastructure iBem3D™, officiellement Poly3D™

(SCHLUMBERGER Limited, HOUSTON, Texas) pour bâtir un modèle, résoudre des équations, etc.

[0026] À titre d'exemple, on peut mettre en œuvre l'infrastructure iBem3D™ pour de la modélisation de contrainte, par exemple, au moyen d'un ou plusieurs modules. À titre d'exemple, un tel progiciel peut mettre en œuvre une méthode des éléments finis de frontière (BEM). Une telle infrastructure peut fournir une caractérisation et une modélisation de fractures sous-séismiques, ce qui peut faciliter de meilleures décisions de forage (par ex., en utilisant les principes fondamentaux de la physique qui régissent la déformation des roches). Par exemple, la sortie peut comprendre la densité et l'orientation modélisées des failles sous-séismiques dans une région (par ex., qui peut comprendre un réservoir ou des réservoirs). À titre d'exemple, une infrastructure peut fournir une caractérisation et une modélisation de fractures où au moins une partie des fractures peut être associée à une opération telle qu'une opération de fracturation hydraulique.

[0027] À titre d'exemple, une infrastructure peut fournir une modélisation de faille en 3D. Dans un tel exemple, un flux de traitement peut viser à identifier des régions d'hydrocarbures pour une éventuelle extraction. La modélisation multidimensionnelle de faille peut contribuer à bâtir et/ou compléter un modèle géologique de structure de réservoir. Les capacités à terme dans une infrastructure peuvent aider à réduire les incertitudes dans l'interprétation sismique des réseaux de failles complexes et permettre de bâtir, d'analyser, etc. des modèles géologiques complexes sous-contraints plus précis.

[0028] Pour ce qui est de la conception de puits, forer dans des réservoirs à structure complexe peut présenter des défis, en particulier là où une zone peut avoir une activité tectonique. Une infrastructure peut prévoir la création de modèles multidimensionnels, par exemple de champs de contraintes hétérogènes actuels qui peuvent être provoqués par une formation active de failles, des diapirs de sel, etc.

[0029] À titre d'exemple, une contrainte tectonique peut être une paléocontrainte ou, par exemple, associée à une activité telle qu'une fracturation artificielle (par ex., fracturation hydraulique, etc.).

[0030] La Figure 1 montre l'exemple d'un système 100 qui comprend diverses composantes de gestion 110 pour gérer divers aspects d'un environnement géologique 150 (par ex., un environnement qui comprend un bassin sédimentaire, un réservoir 151, une ou plusieurs failles 153-1, un ou plusieurs géocorps 153-2, etc.). Par exemple, les

composants de gestion 110 peuvent permettre une gestion directe ou indirecte de la détection, du forage, de l'injection, de l'extraction, etc., par rapport à l'environnement géologique 150. Successivement, des informations supplémentaires sur l'environnement géologique 150 peuvent devenir disponibles en tant que retour 160 (p. ex.,
5 facultativement comme entrée pour une ou plusieurs des composants de gestion 110).

[0031] Dans l'exemple de la Figure 1, les composants de gestion 110 comprennent un composant 112 de données sismiques, un composant 114 d'informations supplémentaires (par ex., des données de puits/diagraphie), un composant 116 de traitement, un composant 120 de simulation, un composant 130 d'attribut, un composant
10 142 d'analyse/visualisation et un composant 144 de flux de traitement. En fonctionnement, les données sismiques et autres informations fournies par les composants 112 et 114 peuvent être entrées dans le composant 120 de simulation.

[0032] Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, le composant 120 de simulation peut dépendre d'entités 122. Les entités 122 peuvent comprendre des entités
15 terrestres ou des objets géologiques tels que puits, surfaces, corps, réservoirs, etc. Dans le système 100, les entités 122 peuvent comprendre des représentations virtuelles d'entités physiques réelles qui sont reconstruites à des fins de simulation. Les entités 122 peuvent comprendre des entités basées sur des données obtenues par détection, observation, etc. (par ex., les données sismiques 112 et autres informations 114). Une
20 entité peut être caractérisée par une ou plusieurs propriétés (par ex., une entité de grille de pilier géométrique d'un modèle terrestre peut être caractérisée par une propriété de porosité). De telles propriétés peuvent représenter une ou plusieurs mesures (par ex., données acquises), des calculs, etc.

[0033] Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, le composant 120 de
25 simulation peut fonctionner conjointement avec une infrastructure telle qu'une infrastructure orientée objet. Dans une telle infrastructure, les entités peuvent comprendre des entités reposant sur des classes prédéfinies pour faciliter la modélisation et la simulation. Un exemple disponible dans le commerce d'infrastructure orientée objet est le .NET™ Framework de MICROSOFT® (REDMOND, Washington), qui fournit un
30 jeu de classes extensibles d'objets. Dans le .NET™ Framework, une classe d'objets encapsule un module de code réutilisable et des structures de données associées. On peut utiliser des classes d'objets pour instancier des instances d'objet à utiliser dans un programme, un script, etc. Par exemple, des classes de trous de sonde peuvent définir des objets pour représenter les trous de sonde sur la base de données de puits.

[0034] Dans l'exemple de la Figure 1, le composant 120 de simulation peut traiter les informations pour se conformer à un ou plusieurs attributs spécifiés par le composant 130 d'attribut, qui peut comprendre une bibliothèque d'attributs. Un tel traitement peut intervenir préalablement à l'entrée dans le composant 120 de simulation (par ex., se référer au composant 116 de traitement). À titre d'exemple, le composant 120 de simulation peut effectuer des opérations sur des informations d'entrée sur la base d'un ou plusieurs attributs spécifiés par le composant 130 d'attribut. Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, le composant 120 de simulation peut construire un ou plusieurs modèles de l'environnement géologique 150, sur lesquels on peut compter pour simuler le comportement de l'environnement géologique 150 (p. ex., réactif à un ou plusieurs actes, qu'ils soient naturels ou artificiels). Dans l'exemple de la Figure 1, le composant 142 d'analyse/visualisation peut permettre une interaction avec un modèle ou des résultats à base de modèles (par ex., des résultats de simulation, etc.). À titre d'exemple, la sortie du composant de simulation 120 peut être entrée dans un ou plusieurs autres flux de traitement, comme indiqué par un composant 144 de flux de traitement.

[0035] À titre d'exemple, le composant 120 de simulation peut comprendre une ou plusieurs caractéristiques d'un simulateur tel que le simulateur de réservoir ECLIPSE™ (SCHLUMBERGER Limited, HOUSTON, Texas), le simulateur de réservoir INTERSECT™ (SCHLUMBERGER Limited, HOUSTON, Texas), etc. À titre d'exemple, un composant de simulation, un simulateur, etc. peuvent comprendre des fonctionnalités pour mettre en œuvre une ou plusieurs techniques sans maillage (par ex., pour résoudre une ou plusieurs équations, etc.). À titre d'exemple, on peut simuler un réservoir ou des réservoirs par rapport à une ou plusieurs techniques améliorées d'extraction (par ex., considérer un procédé thermique comme le SADG, etc.).

[0036] Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, les composants 110 de gestion peuvent comprendre des caractéristiques d'une infrastructure disponible dans le commerce comme l'infrastructure « de la sismique à la simulation » PETREL® (SCHLUMBERGER Limited, HOUSTON, Texas). L'infrastructure PETREL® propose des composants qui permettent une optimisation des opérations d'exploration et de développement. L'infrastructure PETREL® comprend des composants de logiciel « de la sismique à la simulation » qui peuvent produire en sortie des informations à utiliser pour augmenter la performance d'un réservoir, par ex., en améliorant la productivité des équipes d'actifs. Grâce à l'utilisation d'une telle infrastructure, divers professionnels (p.

ex., géophysiciens, géologues et ingénieurs de réservoir) peuvent développer des flux de traitement collaboratifs et intégrer les opérations pour rationaliser les processus. On peut considérer une telle infrastructure comme une application et comme une application dirigée par les données (par ex., où les données sont entrées à des fins de modélisation, simulation, etc.).

[0037] Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, divers aspects des composants 110 de gestion peuvent comprendre des modules additionnels ou modules d'extension qui fonctionnent selon les spécifications d'un environnement d'infrastructure. Par exemple, un environnement d'infrastructure disponible dans le commerce vendu sous le nom d'environnement d'infrastructure OCEAN® (SCHLUMBERGER Limited, HOUSTON, Texas) permet l'intégration de modules additionnels (ou modules d'extension) dans un flux de traitement d'infrastructure PETREL®. L'environnement d'infrastructure OCEAN® applique un effet multiplicateur aux outils .NET™ (MICROSOFT Corporation, REDMOND, Washington) et offre des interfaces stables, conviviales pour un développement efficace. Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, on peut implanter diverses composantes en tant que modules additionnels (ou modules d'extension) qui se conforment aux spécifications d'un environnement d'infrastructure (par ex., selon les spécifications de l'interface de programmation d'applications (API), etc.) et fonctionnent suivant elles.

[0038] La Figure 1 montre aussi un exemple d'une infrastructure 170 qui comprend une couche 180 de simulation de modèles avec une couche 190 de services de l'infrastructure, une couche 195 de noyau d'infrastructure et une couche 175 de modules. L'infrastructure 170 peut comprendre l'infrastructure OCEAN® disponible dans le commerce, la couche 180 de simulation de modèles étant le logiciel centré sur les modèles PETREL® disponible dans le commerce, qui héberge les applications d'infrastructure OCEAN®. Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, le logiciel PETREL® peut être considéré comme une application dirigée par les données. Le logiciel PETREL® peut comprendre une infrastructure pour l'élaboration et la visualisation des modèles.

[0039] À titre d'exemple, une infrastructure peut comprendre des fonctionnalités pour mettre en œuvre une ou plusieurs techniques de génération de maillage. Par exemple, une infrastructure peut comprendre un composant d'entrée pour recevoir les informations provenant de l'interprétation des données sismiques, un ou plusieurs attributs reposant au moins en partie sur des données sismiques, des données de

journal, des données d'images, etc. Une telle infrastructure peut comprendre un composant de génération de maillage qui traite les informations d'entrée, facultativement combinées à d'autres informations, pour produire un maillage.

[0040] Dans l'exemple de la Figure 1, la couche 180 de simulation de modèles peut fournir des objets de domaine 182, agir comme source 184 de données, pourvoir au rendu 186 et fournir diverses interfaces utilisateur 188. Le rendu 186 peut fournir un environnement graphique dans lequel les applications peuvent afficher leurs données alors que les interfaces utilisateur 188 peuvent fournir une ergonomie commune pour les composants d'interface utilisateur d'applications.

[0041] À titre d'exemple, les objets de domaine 182 peuvent comprendre des objets entités, des objets propriétés et facultativement d'autres objets. On peut utiliser les objets entités pour représenter géométriquement des puits, des surfaces, des corps, des réservoirs, etc., tandis que l'on peut utiliser les objets propriétés pour fournir des valeurs de propriété ainsi que des versions de données et des paramètres d'affichage. Par exemple, un objet entité peut représenter un puits là où un objet propriété fournit des informations de journal ainsi que des informations de version et des informations d'affichage (par ex., pour afficher le puits en tant que partie d'un modèle).

[0042] Dans l'exemple de la Figure 1, les données peuvent être stockées dans une ou plusieurs sources de données (ou magasins de données, généralement des dispositifs physiques de stockage de données), qui peuvent être sur le même site physique ou sur des sites différents et accessibles via un ou plusieurs réseaux. On peut configurer la couche 180 de simulation de modèles pour modéliser des projets. On peut stocker un projet particulier en tant que tel, les informations de projet stockées pouvant comprendre des entrées, des résultats et des cas. Ainsi, lorsque s'achève une session de modélisation, un utilisateur peut stocker un projet. Ultérieurement, on peut accéder au projet et le restaurer au moyen de la couche 180 de simulation de modèles, qui peut recréer des instances des objets de domaine pertinents.

[0043] Dans l'exemple de la Figure 1, l'environnement géologique 150 peut comprendre des couches (par ex., la stratification) qui comprennent un réservoir 151 et une ou plusieurs autres caractéristiques telles que la faille 153-1, le géocorps 153-2, etc. À titre d'exemple, l'environnement géologique 150 peut être équipé de n'importe quel appareil parmi une variété de capteurs, détecteurs, actionneurs, etc. Par exemple, l'équipement 152 peut comprendre un ensemble de circuits de communication pour recevoir et émettre des informations en ce qui concerne un ou plusieurs réseaux 155.

De telles informations peuvent comprendre des informations associées à un équipement de fond de puits 154, qui peut être de l'équipement pour acquérir des informations, pour aider à l'extraction des ressources, etc. D'autres équipements 156 peuvent être situés loin d'un emplacement de forage et comprendre exploration, détection, émission ou d'autres circuits. Un tel équipement peut comprendre des circuits de stockage et de communication pour stocker et communiquer données, instructions, etc. À titre d'exemple, on peut prévoir un ou plusieurs satellites à des fins de communication, d'acquisition de données, etc. Par exemple, la Figure 1 montre un satellite en communication avec le réseau 155 qui peut être configuré pour les communications, en notant que le satellite peut en plus ou en variante comprendre des circuits pour l'imagerie (par ex., spatiale, spectrale, temporelle, radiométrique, etc.).

[0044] La Figure 1 montre aussi l'environnement géologique 150 comme comprenant facultativement les équipements 157 et 158 associés à un puits qui comprend une partie sensiblement horizontale qui peut couper une ou plusieurs fractures 159. Par exemple, considérons un puits dans une formation de schistes qui peut comprendre des fractures naturelles, des fractures artificielles (p. ex., des fractures hydrauliques) ou une combinaison de fractures naturelles et artificielles. À titre d'exemple, on peut forer un puits pour un réservoir qui a une grande extension latérale (p. ex., une formation présente sous forme de couche(s) sensiblement horizontale(s)). Dans un tel exemple, il peut exister des variations latérales de propriétés, de contraintes, etc., une évaluation de ces variations pouvant aider à planifier des opérations, etc. pour exploiter un réservoir à grande extension latérale (p. ex., par fracturation, injection, extraction, etc.). À titre d'exemple, les équipements 157 et/ou 158 peuvent comprendre des composants, un système, des systèmes, etc. pour une fracturation, une détection sismique, une analyse des données sismiques, une évaluation d'une ou de plusieurs fractures, etc.

[0045] Comme cela a été mentionné, on peut utiliser le système 100 pour effectuer un ou plusieurs flux de traitement. Un flux de traitement peut être un processus qui comprend un certain nombre d'opérations. Une opération peut intervenir sur des données, par ex. pour créer de nouvelles données, pour mettre à jour les données existantes, etc. À titre d'exemple, une opération peut intervenir sur une ou plusieurs entrées et créer un ou plusieurs résultats reposant, par ex., sur un ou plusieurs algorithmes. À titre d'exemple, un système peut comprendre un éditeur de flux de traitement pour créer, éditer, exécuter, etc. un flux de traitement. Dans un tel exemple,

l'éditeur de flux de traitement peut prévoir la sélection d'un ou plusieurs flux de traitement prédéfinis, d'un ou plusieurs flux de traitement personnalisés, etc. À titre d'exemple, un flux de traitement peut être un flux de traitement pouvant être implanté dans le logiciel PETREL®, par ex., qui intervient sur des données sismiques, un/des attribut(s) sismique(s), etc. À titre d'exemple, un flux de traitement peut être un flux de traitement pouvant être implanté dans l'infrastructure OCEAN®. À titre d'exemple, un flux de traitement peut comprendre une ou plusieurs opérations qui accèdent à un module d'extension (par ex., un code exécutable externe, etc.).

[0046] La Figure 2 montre un exemple de bassin sédimentaire 210 (par ex., un environnement géologique), un exemple de procédé 220 de modélisation (par ex., pour un simulateur, etc.), un exemple de formation 230, un exemple de puit de forage 235 dans une formation, un exemple de convention 240 et un exemple de système 250.

[0047] À titre d'exemple, on peut appliquer la simulation de réservoir, la modélisation de systèmes pétroliers, etc. pour caractériser divers types d'environnements de subsurface, y compris les environnements comme ceux de la Figure 1.

[0048] Sur la Figure 2, le bassin sédimentaire 210, qui est un environnement géologique, comprend des horizons, des failles, un ou plusieurs géocorps et faciès formés sur une certaine période de temps géologique. Ces caractéristiques sont réparties en deux ou trois dimensions dans l'espace, par exemple, par rapport à un système de coordonnées cartésiennes (par ex., x, y et z) ou un autre système de coordonnées (p. ex., cylindrique, sphérique, etc.). Comme on le voit, le procédé 220 de modélisation comprend un bloc 224 d'acquisition de données et un bloc 228 de géométrie de modèles. Certaines données peuvent être impliquées dans la construction d'un modèle initial et, par la suite, le modèle peut facultativement être mis à jour en réponse à la sortie du modèle, des changements dans le temps, des phénomènes physiques, des données supplémentaires, etc. À titre d'exemple, les données pour la modélisation peuvent comprendre un ou plusieurs des éléments suivants : cartes de profondeur ou d'épaisseur, géométries de faille et calendrier provenant de données sismiques, de télédétection, électromagnétiques, de gravité, d'affleurement et de rapport de forage. En outre, les données peuvent comprendre des cartes de profondeur et d'épaisseur résultant de variations de faciès (p. ex., en raison de discordances sismiques) supposées suivre les événements géologiques (temps "iso") et données peuvent comprendre des

variations latérales de faciès (p. ex., en raison d'une variation latérale des caractéristiques de sédimentation).

[0049] Pour procéder à la modélisation des processus géologiques, on peut obtenir des données, par exemple, des données telles que des données géochimiques (p. ex., température, type de kérogène, richesse organique, etc.), des données temporelles (provenant p. ex. de paléontologie, datation radiométrique, inversions magnétiques, propriétés de roches et fluides, etc.) et données de conditions aux limites (par ex., historique de flux thermique, température de surface, profondeur d'eau fossile, etc.).

10 **[0050]** Dans la modélisation des systèmes de bassin et de pétrole, on peut modéliser des quantités telles que les répartitions des températures, des pressions et des porosités dans les sédiments, par ex., en résolvant des équations aux dérivées partielles (PDEs) au moyen d'une ou plusieurs techniques numériques. La modélisation peut aussi modéliser la géométrie par rapport au temps, par exemple, pour rendre
15 compte des changements découlant d'événements géologiques (par ex., dépôts de matériau, érosion de matériau, déplacement de matériau, etc.).

[0051] Une infrastructure de modélisation disponible dans le commerce vendu sous le nom d'infrastructure PETROMOD® (SCHLUMBERGER Limited, HOUSTON, Texas) comprend des fonctionnalités pour la saisie de divers types d'informations (par
20 ex., sismiques, de puits, géologiques, etc.) pour modéliser l'évolution d'un bassin sédimentaire. L'infrastructure PETROMOD® pourvoit à la modélisation de systèmes pétroliers via la saisie de diverses données telles que des données sismiques, des données de puits et autres données géologiques, par exemple, pour modéliser l'évolution d'un bassin sédimentaire. L'infrastructure PETROMOD® peut prédire si et comment un
25 réservoir a été chargé en hydrocarbures, y compris, par exemple, la source et le calendrier de production d'hydrocarbures, les itinéraires de migration, les quantités, la pression interstitielle et le type d'hydrocarbures dans la subsurface ou dans des conditions de surface. Combinés avec une infrastructure comme l'infrastructure PETROMOD®, les flux de traitement peuvent être structurés pour offrir des solutions
30 d'exploration à l'échelle bassin-à-prospect. Un échange de données entre les infrastructures peut faciliter la construction de modèles, l'analyse de données (p. ex., données d'infrastructure PETROMOD® analysées à l'aide des capacités de l'infrastructure PETREL®) et le couplage des flux de traitement.

[0052] Comme le montre la Figure 2, la formation 230 comprend une surface sensiblement horizontale et diverses couches souterraines. À titre d'exemple, un puit de forage peut être sensiblement vertical. Pour donner un autre exemple, un puit de forage peut être dévié. Dans l'exemple de la Figure 2, le puit de forage 235 peut être considéré
5 comme un forage vertical, par exemple, où l'axe des z s'étend vers le bas perpendiculairement à la surface horizontale de la formation 230. À titre d'exemple, on peut mettre en place un outil 237 dans un puit de forage, par exemple, pour obtenir des informations. Comme cela a été mentionné, un outil de puit de forage peut être configuré pour obtenir des images électriques du puit de forage. À titre d'exemple, l'outil de forage
10 intégral Formation MicroImager (FMI) (SCHLUMBERGER Limited, HOUSTON, Texas) peut acquérir des données d'image de puits de forage. Une séquence d'acquisition de données pour un tel outil peut comprendre les opérations consistant à faire passer l'outil dans un puit de forage avec les tampons d'acquisition fermés, ouvrir les tampons et les appuyer contre une paroi du puit de forage, faire circuler du courant électrique dans le
15 matériau délimitant le puit de forage tout en déplaçant l'outil dans le puit de forage et à capter à distance le courant, qui est modifié par les interactions avec le matériau.

[0053] À titre d'exemple, un puit de forage peut être vertical, dévié et/ou horizontal. À titre d'exemple, on peut mettre en place un outil pour obtenir des informations dans une partie horizontale d'un puit de forage. L'analyse de ces informations peut révéler
20 des cavités, des plans de dissolution (p. ex., dissolution le long des plans de stratification), caractéristiques liées aux contraintes, événements de dépression, etc. À titre d'exemple, un outil peut acquérir des informations qui peuvent aider à caractériser un réservoir fracturé, facultativement où les fractures peuvent être naturelles et/ou artificielles (par ex., des fractures hydrauliques). De telles informations peuvent faciliter
25 les exécutions, un traitement de stimulation, etc. À titre d'exemple, on peut analyser les informations acquises par un outil à l'aide d'une infrastructure tel que l'infrastructure TECHLOG® (SCHLUMBERGER Limited, HOUSTON, Texas).

[0054] Quant à la convention 240 pour le pendage, comme il est montré, l'orientation tridimensionnelle d'un plan peut être définie par son pendage et sa direction.
30 Le pendage est l'angle de pente d'un plan par rapport à un plan horizontal (par ex., un plan imaginaire), mesuré dans un plan vertical suivant une direction spécifique. Le pendage peut être défini par une magnitude (par ex., aussi appelée angle ou quantité) et un azimut (p. ex., aussi connu sous le nom de direction). Comme le montre la convention 240 de la Figure 2, divers angles ϕ indiquent l'angle de pente vers le bas, par exemple,

par rapport à un plan horizontal imaginaire (par ex., surface supérieure plate) ; tandis que le pendage se réfère à la direction vers laquelle penche un plan incliné (par ex., qui peut être donnée en termes de degrés, de direction de compas, etc.). Une autre caractéristique représentée dans la convention de la Figure 2 est la direction (« strike »), qui est l'orientation de la ligne créée par l'intersection d'un plan incliné et d'un plan horizontal (par ex., considérer la surface supérieure plate comme étant un plan horizontal imaginaire).

[0055] Certaines conditions supplémentaires concernant le pendage et la direction peuvent s'appliquer à une analyse, par exemple, en fonction des circonstances, orientation des données collectées, etc. Un terme est "vrai pendage" (voir, par ex., Dip_T dans la convention 240 de la Figure 2). Le vrai pendage est le pendage d'un plan directement mesuré perpendiculairement à la direction (voir, par ex., la ligne dirigée vers le nord et étiquetée "direction" et l'angle α_{90}) et aussi la valeur maximale possible de la magnitude du pendage. Un autre terme est "pendage apparent" (voir, par ex., Dip_A dans la convention 240 de la Figure 2). Le pendage apparent peut être le pendage d'un plan tel que mesuré dans toute autre direction que celle du vrai pendage (voir, par ex., ϕ_A en tant que Dip_A pour l'angle α) ; cependant, il est possible que le pendage apparent soit égal au vrai pendage (voir, par ex., ϕ en tant que $Dip_A = Dip_T$ pour l'angle α_{90} par rapport à la direction). En d'autres termes, là où on utilise le terme de pendage apparent (par ex., dans un procédé, une analyse, un algorithme, etc.), pour un plan incliné particulier, une valeur pour "pendage apparent" peut être équivalente au vrai pendage de ce plan incliné particulier.

[0056] Comme le montre la convention 240 de la Figure 2, le pendage d'un plan vu selon une coupe perpendiculaire à la direction est le vrai pendage (voir, par ex., la surface avec ϕ comme $Dip_A = Dip_T$ pour l'angle α_{90} par rapport à la direction). Comme cela a été indiqué, le pendage observé sur une coupe dans toute autre direction est le pendage apparent (voir, par ex., les surfaces étiquetées Dip_A). En outre, comme le montre la convention 240 de la Figure 2, le pendage apparent peut être d'environ 0 degrés (par ex., parallèle à une surface horizontale où le bord d'un plan sécant s'étend dans le sens de la direction).

[0057] En termes d'observation du pendage dans les puits de forage, on observe le vrai pendage dans les puits forés verticalement. Dans les puits forés suivant toute autre orientation (ou déviation), les pendages observés sont des pendages apparents (par ex., que certains désignent par pendages relatifs). Afin de déterminer les valeurs

de vrai pendage pour les plans observés dans de tels trous de sonde, à titre d'exemple, on peut appliquer un calcul vectoriel (par ex., sur la base de la déviation du puit de forage) à une ou plusieurs valeurs de pendage apparent.

[0058] Comme cela a été mentionné, un autre terme qui trouve une utilisation dans les interprétations sédimentologiques à partir d'images de puit de forage est "pendage relatif" (par ex., Dip_R). Une valeur de vrai pendage mesurée à partir d'images de puit de forage dans des roches déposées dans des environnements très calmes peut être soustraite (par ex., au moyen de soustraction vectorielle) de pendages dans un corps sablonneux. Dans un tel exemple, les pendages résultants sont appelés pendages relatifs et peuvent trouver une utilisation dans l'interprétation de l'orientation du corps sablonneux.

[0059] On peut utiliser une convention telle que la convention 240 en ce qui concerne une analyse, une interprétation, un attribut, etc. (voir, par ex., les différents blocs du système 100 de la Figure 1). À titre d'exemple, on peut décrire, en partie, divers types de caractéristiques par le pendage (par ex., stratification sédimentaire, failles et fractures, cuestas, dykes et filons-couches ignés, foliation métamorphique, etc.). À titre d'exemple, le pendage peut se modifier dans l'espace lorsque la couche approche un géocorps. Par exemple, considérons un corps de sel qui peut s'élever en raison de diverses forces (par exemple, force ascensionnelle, etc.). Dans un tel exemple, le pendage peut tendre vers le haut lorsqu'un corps de sel se déplace vers le haut.

[0060] Une interprétation sismique peut viser à identifier et/ou classer une ou plusieurs limites de subsurface sur la base au moins en partie d'un ou plusieurs paramètres de pendage (par ex., angle ou magnitude, azimut, etc.). À titre d'exemple, on peut décrire divers types de caractéristiques (par ex., stratification sédimentaire, failles et fractures, cuestas, dykes et filons-couches ignés, foliation métamorphique, etc.) au moins en partie par l'angle, au moins en partie par l'azimut, etc.

[0061] À titre d'exemple, on peut proposer des équations pour l'expulsion et la migration du pétrole, qui peuvent être modélisées et simulées, par ex., par rapport à une période de temps. La migration du pétrole à partir d'un matériau source (par ex., migration primaire ou expulsion) peut comprendre l'utilisation d'un modèle de saturation où les valeurs de migration-saturation commandent l'expulsion. Des déterminations en ce qui concerne une migration secondaire du pétrole (par ex. huile ou gaz) peuvent comprendre l'utilisation d'un potentiel hydrodynamique de fluide et la prise en compte des forces d'entraînement qui favorisent l'écoulement du fluide. De telles forces peuvent

inclure le gradient de flottabilité, le gradient de pression interstitielle et le gradient de pression capillaire.

[0062] Comme le montre la Figure 2, le système 250 comprend un ou plusieurs dispositifs 252 de stockage d'informations, un ou plusieurs ordinateurs 254, un ou plusieurs réseaux 260 et un ou plusieurs modules 270. Pour ce qui est des dits ordinateurs 254, chaque ordinateur peut comporter un ou plusieurs processeurs (par ex., ou processeur cœur) 256 et une mémoire 258 pour stocker des instructions (par ex., des modules) exécutables par au moins un des dits processeurs. À titre d'exemple, un ordinateur peut comprendre une ou plusieurs interfaces de réseau (par ex., filaires ou sans fil), une ou plusieurs cartes graphiques, une interface d'affichage (par ex. filaire ou sans fil), etc. À titre d'exemple, on peut stocker, traiter, communiquer, etc. une imagerie telle que l'imagerie de surface (par ex., satellitaire, géologique, géophysique, etc.). À titre d'exemple, les données peuvent comprendre des données SAR, des données GPS, etc. et peuvent être stockées, par exemple, dans un ou plusieurs des dispositifs 252 de stockage.

[0063] À titre d'exemple, lesdits modules 270 peuvent comprendre des instructions (par ex., stockées en mémoire) exécutables par un ou plusieurs processeurs pour ordonner au système 250 d'effectuer diverses actions. À titre d'exemple, le système 250 peut être configuré de telle sorte que lesdits modules 270 se chargent d'établir l'infrastructure 170 de la Figure 1 ou une partie de celui-ci. À titre d'exemple, on peut exécuter un ou plusieurs procédés, techniques, etc. au moyen d'un ou plusieurs modules, qui peuvent être, par exemple, un ou plusieurs des dits modules 270 de la Figure 2.

[0064] La Figure 3 illustre un exemple d'un régime tectonique 300 et des exemples de formation de failles normales 310, de failles à décrochement 320 et de failles inverses 330. On peut définir la contrainte, par exemple, comme la force agissant sur un plan rapportée à l'unité de surface. Dans un corps solide, par exemple, un état de contrainte en un point dans le corps solide peut être décrit par les orientations et les magnitudes de trois contraintes appelées contraintes principales, qui sont orientées perpendiculairement l'une à l'autre (par ex., orthogonales entre elles).

[0065] Comme le montre la Figure 3, σ_1 , σ_2 et σ_3 sont des contraintes principales de compression ou de traction où, en magnitude, $1 > 2 > 3$. À titre d'exemple, autour d'un point, on peut montrer ou représenter les trois contraintes principales sous forme d'un ellipsoïde où la magnitude de chaque composante définit un maximum (par ex. et un « minimum ») sur l'axe correspondant des trois axes orthogonaux. Le « minimum »

est en fait un autre maximum car contrainte de compression et déformation de raccourcissement sont considérées comme positives en mécanique des roches et en tectonique parce que dans le globe terrestre les trois contraintes principales ont tendance à être de compression (par ex., sauf autour de vides souterrains tels que les grottes, très
5 près de la surface du globe, etc.).

[0066] On peut définir le régime tectonique 300 en considérant qu'un axe est vertical. Par exemple, un régime de faille normale correspond à σ_1 qui est vertical, un régime de faille à décrochement correspond à σ_2 qui est vertical et un régime de faille chevauchante ou inverse correspond à σ_3 qui est vertical. Le régime tectonique 300 peut
10 également définir des contraintes σ_H , σ_h et σ_v comme étant la contrainte horizontale maximale (σ_H), la contrainte horizontale minimale (σ_h) qui peut être orthogonale par rapport à la contrainte horizontale maximale et une contrainte verticale (σ_v). L'orientation de la contrainte horizontale maximale σ_H peut être définie par un angle θ_H , qui peut être de locale (par ex., pour un point ou une caractéristique), de champ distant, etc.

[0067] La Figure 4 montre quelques exemples d'informations d'orientation en ce qui concerne des fractures 410, qui peuvent comprendre une fracture de tension 420 (par ex., une diaclase), une fracture de cisaillement 430 et une fracture de compression 450 (par ex., une stylolithe). À titre d'exemple, on peut parler de fractures mécaniques (par ex., types de fracture mécanique) pour les fractures 420, 430 et 450 ; à noter que des
20 phénomènes chimiques, thermiques, etc. peuvent être impliqués.

[0068] Une fracture de tension peut se former là où une contrainte de traction dans une direction perpendiculaire à un plan de fracture potentielle atteint une résistance à la traction de la roche. Une fracture de tension peut montrer une extension perpendiculaire aux parois de la fracture. Les types de fractures de tension (par ex., ou ruptures par
25 tension) comprennent, par exemple, les diaclases et les veines.

[0069] Une fracture de cisaillement peut être provoquée par une contrainte de cisaillement. Une fracture de cisaillement peut être une fracture le long de laquelle le mouvement relatif est parallèle aux parois de la fracture. Les types de fractures de cisaillement comprennent, par exemple, les failles et les bandes de déformation.

[0070] Une fracture de compression (ou une fracture antifissures ou de fermeture) peut se former avec une contrainte de compression dans une direction perpendiculaire à un éventuel plan de fracture. Une fracture de compression peut montrer une contraction perpendiculaire aux parois de la fracture. Les types de fractures de compression comprennent, par exemple, les stylolithes et les bandes de tassement.

[0071] À titre d'exemple, l'orientation d'une fracture naturelle peut être sans rapport avec les orientations des contraintes actuelles dans une masse rocheuse parce que, par exemple, l'orientation de la fracture reflète les orientations des contraintes dans la roche fracturée à l'époque de la formation de la fracture (p. ex., envisagez un événement en temps géologique), les régimes de contraintes régionales changent au fil du temps, les fractures naturelles furent formées dans le passé géologique sous l'influence de paléocontraintes (p. ex., des contraintes anciennes) qui n'existent plus, etc.

[0072] À titre d'exemple, l'orientation et la densité d'ensembles de fractures peuvent varier avec leur position dans une région qui nous intéresse parce que les régimes de contraintes varient dans l'espace ainsi que dans le temps même si la contrainte régionale maintient une orientation relativement constante (par ex., contrainte à grande échelle).

[0073] À titre d'exemple, les contraintes locales peuvent différer en orientation et/ou magnitude des contraintes régionales en raison de plissement, de formation de failles, de différences lithologiques, de diagénèse, de variations de pression interstitielle et d'autres influences.

[0074] Si l'on se reporte à la Figure 4, une diaclase peut être une fracture rocheuse naturelle formée principalement par un mouvement de mode I. À titre d'exemple, une morphologie de surface plumeuse peut être indicatrice de fissuration. Les diaclases non minéralisées peuvent être très perméables et les diaclases fermées peuvent être des diaclases qui sont contenues à l'intérieur de lits individuels d'une lithologie cassante. Deux types particuliers de diaclases peuvent être utiles parce qu'ils peuvent fournir le sens du glissement et parfois la direction du glissement, des critères pour le mouvement de la faille : Les diaclases pennées, qui sont un type de diaclase qui se forme tout à côté de failles pendant le mouvement et/ou la propagation de la faille ; et les diaclases de queue ou les fissures d'aile se forment à l'extrémité d'une faille.

[0075] La Figure 4 montre aussi deux failles qui se croisent, par exemple, pour former un angle aigu et un angle obtus (cf., p. ex., les flèches à deux pointes dans le diagramme de la fracture de cisaillement 430). À titre d'exemple, une faille peut être un type de fracture rocheuse naturelle formée principalement par des mouvements de mode II et/ou mode III. Il est possible, par exemple, qu'une fracture rocheuse naturelle qui initialement s'est formée comme une diaclase puisse se réactiver en tant que fracture en mode de glissement et être considérée comme une diaclase « faillée ».

[0076] Les failles peuvent avoir un large éventail de morphologies et de types de remplissage. Les failles peuvent aller de très perméables à hautement imperméable en fonction du mode de formation et du type de remplissage. On peut, parfois, déterminer le sens du glissement et la direction du glissement de faille à partir de caractéristiques de surface telles que par exemple des stries de glissement.

[0077] Quant à une stylolithe (p. ex., une couche minéralisée de dissolution par pression), on peut la définir comme une zone de résidu insoluble produite par une dissolution accrue par la contrainte. Les stylolithes peuvent avoir une structure de cône dans cône qui produit en section transversale une apparence caractéristique en zigzag (voir, par ex., la stylolithe représentée sur la Figure 4). Une stylolithe est une fracture type, par exemple, une antifissure de contrainte-corrosion.

[0078] Les stylolithes peuvent servir de barrières d'écoulement parce qu'ils peuvent comprendre un résidu insoluble qui peut avoir un grain très fin et, par exemple, être riche en argile. Les stylolithes peuvent être faibles et, par exemple, facilement réactivées en diaclases par des événements tectoniques postérieurs. Dans les réservoirs d'hydrocarbures, une stylolithe peut être perméable. À titre d'exemple, la fracturation hydraulique peut réactiver une ou plusieurs structures, par exemple, pour constituer un réseau.

[0079] À titre d'exemple, on peut définir une slickolithe comme étant un type de stylolithe dans laquelle les dents sont inclinées à moins de 90 degrés environ par rapport au plan de la stylolithe. Les slickolithes peuvent se former sous un angle de σ_1 , par exemple, par dissolution le long d'une fracture préexistante. Les slickolithes peuvent être des surfaces de déplacement par cisaillement ainsi que de raccourcissement.

[0080] À titre d'exemple, une fracture peut être de type artificiel ou induit. On peut définir une telle fracture comme une fracture de roche produite par des activités humaines, telles que forage, fracturation hydraulique accidentelle ou intentionnelle, manutention des noyaux, etc.

[0081] Comme cela est illustré sur la Figure 4, une diaclase (p. ex., une fracture de tension) peut fournir des informations quant à la direction de σ_3 tandis qu'une stylolithe (p. ex., une fracture de compression) peut fournir des informations quant à la direction de σ_1 . Ainsi, à titre d'exemple, les diaclases et/ou stylolithes peuvent fournir des informations d'orientation (par ex., des informations d'orientation locale). Comme on en parlera plus loin ci-dessous, à titre d'exemple, des failles conjuguées (par ex., des

fractures de cisaillement) peuvent fournir des informations, par exemple, où un angle entre σ_1 et l'une des failles peut être rapproché d'un coefficient de frottement interne.

[0082] À titre d'exemple, à l'aide de fractures et d'orientations de stylolithes pour des fractures d'ouverture (diaclasses, veines, dykes) l'orientation de la perpendiculaire à un plan de fracture peut indiquer l'orientation de la direction de contrainte de compression la plus faible (σ_3). À titre d'exemple, une ou plusieurs perpendiculaires (par ex., des vecteurs normaux) à des couches minéralisées de dissolution par pression et/ou stylolithes peuvent indiquer la direction de la contrainte de compression la plus forte (σ_1). À titre d'exemple, à l'aide de mesures d'orientations de fractures, couches minéralisées de dissolution par pression et/ou stylolithes, on peut obtenir une estimation du régime tectonique qui a généré de telles caractéristiques (par ex., par un procédé d'inversion).

[0083] À titre d'exemple, on peut utiliser des striations de faille comme données pour effectuer une inversion afin d'obtenir des informations sur un régime tectonique. À titre d'exemple, on peut utiliser des informations de magnitude comme données pour effectuer une inversion afin d'obtenir des informations sur un régime tectonique. À titre d'exemple, des données GPS et/ou des données InSAR (radar interférométrique à synthèse d'ouverture) peuvent être utilisées pour effectuer une inversion afin d'obtenir des informations sur un régime tectonique. À titre d'exemple, on peut utiliser des données d'horizon aplati pour effectuer une inversion afin d'obtenir des informations sur un régime tectonique. À titre d'exemple, on peut utiliser des données de rejet incliné (par ex. provenant de la sismologie) pour effectuer une inversion afin d'obtenir des informations sur un régime tectonique. À titre d'exemple, on peut fournir et facultativement pondérer (par ex., par type, etc.) un ou plusieurs types de données pour effectuer une ou plusieurs inversions afin de, par exemple, obtenir des informations sur un régime tectonique (par ex. paléocontrainte, etc.).

[0084] La Figure 5 montre un exemple d'un environnement géologique 510 qui comprend divers types de caractéristiques situées autour d'un anticlinal qui peut définir un axe de pli. Comme cela est illustré, l'environnement géologique 510 comprend des couches, au moins une paraséquence, des diaclases, des diaclases cisailées, des failles naissantes, des zones de failles traversantes, des failles intermédiaires, un gradient de glissement et des plaques de glissement. À titre d'exemple, un cheminement sensiblement latéral dans l'environnement géologique 510 peut passer à travers plus de zones de failles traversantes qu'un cheminement sensiblement vertical.

- [0085]** À titre d'exemple, on peut définir un anticlinal comme un pli dans la roche en forme d'arche dans lequel les couches rocheuses sont convexes vers le haut. Dans un tel exemple, les plus vieilles couches rocheuses peuvent former le noyau du pli et en allant vers l'extérieur depuis le noyau on rencontre progressivement des roches plus jeunes. Une formation d'anticlinal peut agir comme un piège à hydrocarbures, en particulier quand elle se présente avec une roche de qualité réservoir dans le noyau et des roches-couvertures imperméables dans les couches extérieures. À titre d'exemple, on peut forer un forage au moins en partie dans une direction sensiblement parallèle à l'axe de pli (par ex., pour produire des hydrocarbures à partir d'un piège).
- 5
- [0086]** On peut analyser des types de pli à l'aide de jalons de plans de stratification choisis au sein d'une structure cylindrique ou conique, qui peuvent s'aligner sur ce qu'on appelle les grands ou petits cercles, dans une vue stéréographique (par ex., un diagramme stéréographique). Par exemple, pour une structure donnée, on peut bâtir une approximation à l'aide d'un cylindre ou d'un cône.
- 10
- [0087]** À titre d'exemple, on peut séquencer les lectures de plongement interprétées sur des données d'image de telle manière que les pendages adjacents au sein d'une séquence soient situés le long d'un grand ou d'un petit cercle (par ex., ou près de celui-ci), ce qui permet ainsi d'illustrer une association avec un élément structural particulier. À titre d'exemple, on peut reconstituer des éléments structuraux, par exemple, comme on peut le voir dans une coupe transversale verticale à travers un environnement géologique.
- 15
- [0088]** À titre d'exemple, on peut caractériser une partie sensiblement horizontale d'un forage, d'un puits, etc. à l'aide d'un ou plusieurs paramètres. Par exemple, envisageons un paramètre de déviation, un paramètre de talon, un paramètre de pointe.
- 20
- À titre d'exemple, on peut caractériser une partie sensiblement horizontale d'un forage, d'un puits, etc. par un pointe-vers-le-haut, un pointe-vers-le-bas, etc. À titre d'exemple, un talon peut être un point dans la trajectoire d'un forage horizontal où l'angle d'inclinaison atteint à peu près 90 degrés. À titre d'exemple, une pointe peut être un point qui représente la profondeur d'un forage horizontal. Par exemple, on peut obtenir
- 25
- un profil de pointe-vers-le-haut là où l'inclinaison est supérieure à environ 90 degrés partout dans une partie horizontale et un profil de pointe-vers-le-bas là où l'inclinaison est inférieure à environ 90 degrés dans une partie horizontale. À titre d'exemple, une partie sensiblement horizontale ou une partie sensiblement latérale peut avoir un angle d'inclinaison globale d'environ 90 degrés ; par exemple, considérons un angle
- 30

d'inclinaison dans une plage allant d'environ 75 degrés à environ 105 degrés ou, par exemple, dans une plage allant d'environ 80 degrés à environ 100 degrés ou, par exemple, dans une plage allant d'environ 85 degrés à environ 95 degrés. Par exemple, on peut façonner le profil d'un forage d'une manière qui vise à maintenir le forage dans une zone productive ou des zones productives (par ex., pour maximiser l'exposition à un ou des réservoirs).

[0089] À titre d'exemple, on peut forer un forage à l'aide d'une technique de forage dit horizontal, qui peut être un sous-ensemble des techniques de forage dirigé. À titre d'exemple, on peut mettre en œuvre une technique de forage horizontal pour obtenir un forage avec une partie qui s'écarte de la verticale d'environ 75 degrés ou plus. À titre d'exemple, on peut mettre en œuvre un forage horizontal pour pénétrer une plus grande longueur d'un réservoir ou de réservoirs (par ex., par comparaison avec un forage vertical). Par exemple, considérons l'environnement géologique 510 de la Figure 5 où l'on peut mettre en œuvre un forage horizontal pour percer un forage dans une direction qui est sensiblement parallèle à l'axe de pli de l'anticlinal. Comme cela a été mentionné, un anticlinal peut agir comme un piège ; à noter que des caractéristiques particulières peuvent exister dans une telle formation (p. ex., des failles, des fractures naturelles, des diaclases, etc.). À titre d'exemple, on peut mettre en œuvre une technique de forage horizontal pour percer un forage ayant une extension latérale qui peut se trouver dans un réservoir formé en partie en raison d'un piège tel qu'un piège d'anticlinal. Dans un tel exemple, l'extension latérale du forage peut traverser une pluralité de failles (par ex., des zones de failles, etc.) et, dans le cas où un outil de subsurface est disposé dans l'extension latérale du forage, on peut acquérir des données en rapport avec l'emplacement de telles failles. À titre d'exemple, on peut analyser les données d'un tel outil de subsurface pour localiser au moins une faille dans le cas où un procédé peut déduire l'emplacement par extrapolation d'une distance (par ex., ou de distances) et d'une direction (par ex., ou de directions) à partir de l'extension latérale du forage (par ex., à des fins de détermination d'un modèle géomécanique, etc.).

[0090] À titre d'exemple, une partie sensiblement latérale d'un puits peut recouper une ou plusieurs fractures naturelles, entrer en contact avec une ou plusieurs formations contenant des ressources, permettre la production d'une ou plusieurs fractures hydrauliques, etc. Le forage horizontal peut comprendre l'utilisation d'équipements tels que, par exemple, une ou plusieurs sifflets déviateurs, des configurations d'assemblage de fond de trou (BHA, bottomhole assembly), des instruments pour mesurer le

cheminement d'un forage dans de multiples dimensions spatiales, des liaisons de données pour communiquer à la surface les mesures prises au fond, des moteurs à boue et composants BHA spéciaux, comprenant des systèmes rotatifs orientables et des trépan. À titre d'exemple, un environnement géologique peut comprendre un hydrocarbure gazeux (par ex., du gaz de schiste, etc.).

5 [0091] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la réception d'informations sur un environnement géologique tel que, par exemple, l'environnement géologique 510, et la mise en œuvre d'un processus d'inversion pour extraire la contrainte tectonique. Dans un tel exemple, on peut utiliser la contrainte tectonique récupérée à des fins de
10 planification, de développement, etc. d'un environnement. Par exemple, on peut forer un ou plusieurs puits selon un plan reposant au moins en partie sur la contrainte tectonique récupérée. Dans un tel exemple, on peut forer un puits, effectuer sa complétion, etc. pour réduire le risque de puits éboulé, pour faciliter l'extraction de la ressource et/ou faciliter un processus de fracturation hydraulique. À titre d'exemple, des informations de
15 contrainte tectonique peuvent faciliter la production de fractures qui peuvent constituer un réseau de fractures. Par exemple, considérons l'exécution d'une fracturation par injection de fluide là où sont formées des fractures, qui peut « réactiver » des fractures naturelles pour constituer un réseau de fractures qui comprend des fractures naturelles et artificielles.

20 [0092] Diverses techniques d'inversion de contrainte pour obtenir des paléocontraintes régionales souscrivent à l'hypothèse de WALLACE-BOTT, qui stipule que, quand la formation de failles s'est produite, la contrainte de cisaillement s'exerçant sur le plan de faille doit être parallèle au vecteur glissement produit et peut donc être utilisée pour déterminer le tenseur des contraintes. L'hypothèse de WALLACE-BOTT
25 peut aussi s'énoncer comme suit : le glissement sur les failles se produit dans la direction de contrainte appliquée maximale ; ou la traction de cisaillement appliquée sur un plan de faille donné provoque un glissement dans la direction et l'orientation de cette traction de cisaillement, indépendamment des failles créées dans une roche intacte ou le long d'une fracture préexistante. D'autres suppositions de l'hypothèse de WALLACE-BOTT
30 incluent que les failles sont planes, que les blocs sont rigides, que ne se produisent ni perturbations de contraintes ni rotations de blocs le long de surfaces de faille et que l'état de contrainte appliquée est uniforme.

[0093] La Figure 6 montre un diagramme stéréographique 610 qui illustre une technique graphique (par ex., le procédé de MEANS) pour déterminer la direction de

glissement d'une faille dont le pôle est tracé au niveau du centre du diagramme stéréographique 610.

5 [0094] La technique graphique démontre que les directions de glissement s'éloignent de l'axe des σ_1 et se rapprochent de l'axe des σ_3 . Si la faille dans le diagramme stéréographique 310 est presque perpendiculaire à l'axe des σ_2 , les angles de longueur δ_1 et δ_3 sont approximativement égaux à 90 degrés. Par conséquent, $a(1) \approx a(3) \approx 0$, bien que leur signe dépende de la toute petite différence entre les angles et 90 degrés. Cela indique en outre que la direction de glissement, S, est faite dévier autour de l'axe des σ_2 .

10 [0095] Les données de glissement de faille agissent pour restreindre l'état de contrainte qui est responsable de la formation de failles. Toutefois, certaines composantes de contrainte ne sont pas déterminées. L'hypothèse de WALLACE-BOTT indique que les directions de glissement ne sont pas affectées par la pression de fluide interstitiel, bien qu'elle puisse commander la force des failles. La contrainte effective
15 peut être donnée par l'équation suivante : $\sigma' = \sigma - pl$. Dans une telle approche, la direction de glissement σ' est la combinaison linéaire de celles par σ et $-pl$. Toutefois, cette dernière est une contrainte isotrope et ne provoque pas de traction de cisaillement. Par conséquent, la pression de fluide interstitiel n'affecte pas la direction de glissement d'une faille. Une telle approche peut être commode pour l'analyse de paléocontraintes
20 comme pression du fluide interstitiel sur une surface de faille quand la faille déplacée peut être difficile à déterminer.

[0096] Les directions de glissement prédites par l'hypothèse de WALLACE-BOTT pour les contraintes σ et $\sigma = q\sigma_0 - pl$ sont les mêmes pour une faille donnée, que p et q soient ou non interprétés comme pression interstitielle et profondeur ; à noter que quand
25 l'état de contrainte est illustré par des cercles de MOHR, p et q indiquent respectivement la position des cercles sur l'abscisse et la dimension des cercles. Un cercle de MOHR est une représentation graphique bidimensionnelle de la loi de transformation pour le tenseur des contraintes de CAUCHY où l'abscisse (σ) et l'ordonnée (τ) de chaque point sur un cercle sont les magnitudes des composants respectivement de la contrainte
30 normale et de la contrainte de cisaillement (par ex., agissant sur le système de coordonnées après rotation). Ainsi, un cercle est le lieu des points qui représentent l'état de contrainte sur des plans individuels à leurs orientations, où les axes représentent les axes principaux de l'élément de contrainte.

[0097] En raison de l'insensibilité de la direction de glissement aux paramètres associés, le glissement de faille n'est pas suffisant pour restreindre les contraintes moyennes et différentielles. Toutefois, il peut être commode pour l'analyse de paléocontraintes, parce qu'il est possible de procéder sans la profondeur et la pression de fluide interstitiel quand chaque faille a été activée.

[0098] Comme cela a été mentionné, il peut être possible de déterminer l'état de contrainte à partir de données de glissement de faille via un processus d'inversion. Par exemple, on peut appliquer un processus classique d'inversion de contrainte fondé sur l'hypothèse de WALLACE-BOTT, qui est non-linéaire parce que la direction de glissement est dénotée par le vecteur unitaire $-\sigma_s/|\sigma_s|$ (par ex., non-linéarité découlant de la division). Par exemple, une équation peut fournir une mesure d'inadéquation d'un état de contrainte présumé à un jeu de données pour un nombre donné de failles et à une fonction décroissante monotone. Dans une telle approche, la mesure dépend des données, des principales orientations et du rapport de contrainte. On peut déterminer l'état optimal de contrainte en maximisant la mesure d'inadéquation (par ex., une fonction objet). La contrainte optimale déterminée par une telle approche de l'inversion de contrainte comporte une incertitude résultant de ce que la direction de glissement est indépendante de p et q .

[0099] Considérons l'équation suivante pour le tenseur des contraintes σ_0 , qui comprend le tenseur orthogonal R et le rapport des contraintes Φ :

$$\sigma_0 = R^T \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot R$$

[00100] Le tenseur défini par l'équation qui précède peut être déterminée par le biais des orientations principales optimales et du rapport des contraintes optimal tels qu'obtenus par une technique inverse.

[00101] Diverses techniques emploient des stries de glissement sur des plans de faille et supposent, selon l'hypothèse de WALLACE-BOTT, que les failles échantillonnées glissèrent dans un champ de contraintes homogène sans interactions mécaniques ni chargement tectonique polyphasé. Des preuves telles que la réactivation de plans de failles, des failles avec des orientations hétérogènes de glissement ont tendance à être de nature plutôt courante et ne sont pas compatibles avec une phase tectonique unique. Les données de glissement de faille-qui sont expliquées par plus

d'une contrainte tectonique ont été appelées hétérogènes. Les techniques d'inversion monphasée peuvent conduire à de fausses solutions et, en diverses circonstances, l'inversion peut produire une solution qui ne soit pas entièrement compatible avec un ou plusieurs sous-ensembles homogènes ; au lieu d'être un compromis entre sous-ensembles.

[00102] Pour aborder un problème de groupement dans le champ taxonomique, on peut mettre en œuvre une technique itérative numérique reposant sur une analyse dynamique de groupement qui sépare des ensembles hétérogènes de données en sous-ensembles. On peut mettre en œuvre une telle approche pour analyser la dynamique de formation de failles car elle peut séparer les données de glissement de faille en sous-ensembles correspondant à différents événements tectoniques. On peut mettre en œuvre une approche pour séparer des phases à partir de données de glissement de faille hétérogènes et, par exemple, une approche peut être fondée sur l'analyse de groupement, une procédure graphique, un procédé inverse multiple, etc., pour analyser des ensembles hétérogènes de données de glissement de faille.

[00103] Quant aux techniques d'inversion de contrainte hétérogène qui traitent des ensembles hétérogènes de données, considérons : (1) celles qui regroupent les données de glissement dans des ensembles de données en analysant la compatibilité des données de glissement avant l'inversion ; (2) celles qui recherchent les tenseurs des contraintes qui expliquent seulement une partie de l'ensemble de données ; (3) celles qui utilisent une fonction d'inadéquation modifiée afin qu'elle intègre le groupement de données pendant un processus de minimisation ; et (4) celles qui calculent le tenseur des contraintes pour chaque donnée de glissement de faille et essaient de réduire au minimum la variété résultante de la variation du tenseur des contraintes.

[00104] La première catégorie (1) comprend le groupement de données qui donnent des inadéquations similaires avec divers tenseurs des contraintes d'essai à l'aide de la méthode des dièdres droits. Une autre approche pour séparer des données hétérogènes en sous-ensembles est de représenter les données de glissement sur une analyse graphique bidimensionnelle. Une telle approche implique que l'une des directions principales de contrainte est supposée être verticale pour simplifier le problème en 4D en un problème en 2D. On peut obtenir le groupement à l'aide de la technique y-R, d'une version de relevé sphérique ou de la superposition d'un graphique de BREDDIN modifié sur un graphique direction-inclinaison des données.

[00105] Dans la deuxième catégorie (2), une approche peut calculer la fonction d'inadéquation uniquement pour les sous-ensembles de taille N ayant les plus petites inadéquations, avec N choisi comme un pourcentage des données. Une autre approche peut regrouper les données en sous-ensembles de taille N et exécuter systématiquement une inversion de contrainte. Une autre approche encore peut repérer les tenseurs des contraintes qui réduisent au minimum l'inadéquation au-dessous d'un seuil choisi pour N données.

[00106] Dans la troisième catégorie (3), une approche peut utiliser une fonction d'inadéquation qui réduit l'influence des observations aberrantes en utilisant des fonctions d'inadéquation d'ordre inférieur. Une autre approche pour réduire l'influence d'un grand sous-ensemble d'observations aberrantes qui sont liées aux phases secondaires peut moduler les critères d'inadéquation par une fonction qui le coupe quand il devient grand, ou dans un schéma de division dure, une fonction triangulaire ou une fonction gaussienne.

[00107] La quatrième catégorie (4) peut partager certains aspects de la technique y-R et peut comprendre l'exploration des orientations des tenseurs des contraintes pour obtenir une donnée individuelle de glissement et calculer le rapport R des contraintes de façon à ce qu'il corresponde à la direction de glissement observée. Dans une telle approche, les tenseurs solutions sont ceux ayant la plus faible variation sur un sous-ensemble des données.

[00108] Diverses techniques multi-phases (par ex., y-R, dièdres, inversion directe, etc.) telles qu'appliquées à l'ensemble multi-phase de données OGMORE indiquent que peuvent en résulter de fausses solutions ainsi que des tenseurs des contraintes parasites. Ainsi une compétence géologique peut servir dans les cas où une technique multi-phase automatique peut donner des résultats incertains.

[00109] Au sein de l'industrie pétrolière et gazière, il peut exister des scénarios qui impliquent de multiples phases tectoniques et des types de fracture mécanique inconnus.

[00110] La connaissance d'un champ de paléocontraintes hétérogène peut aider à prédire les fractures naturelles. Comme le glissement le long des plans de faille a tendance à être rarement observé dans un puits de forage, les fractures naturelles (par ex., diaclases, failles, stylolithes, etc.) ont tendance à être prises en compte pendant l'inversion des contraintes.

[00111] L'orientation des fractures naturelles peut être affectée par la perturbation des contraintes autour de systèmes de failles complexes. Dans de telles conditions,

l'utilisation de l'hypothèse de WALLACE-BOTT peut conduire à des résultats peu fiables et, dans certains cas, des modèles géomécaniques peuvent donner de meilleurs résultats. Par exemple, considérons un modèle numérique de déformation rocheuse reposant sur la mécanique des milieux continus pour modéliser des fractures naturelles dans un réservoir. Ajouter une justification géomécanique aux techniques statistiques peut améliorer la capacité de prévision et conduire à des modèles de réservoir fracturé plus réalistes.

[00112] À titre d'exemple, on peut mettre en œuvre une infrastructure comme, par exemple, l'infrastructure iBem3D™, pour effectuer une analyse des contraintes. Une telle infrastructure peut permettre d'utiliser diverses sortes de données de déformation (par ex. stries de glissement, diaclases et veines, fractures de cisaillement, bandes de déformation et failles, stylolithes et bandes de compaction, mécanismes focaux, données InSAR, données GPS, charnières de pli, etc.).

[00113] Un réservoir dans un environnement géologique peut avoir subi de multiples phases tectoniques, par exemple, ayant pour résultat une variété d'orientations de données de fracture (par ex., des diaclases, des fractures de cisaillement, des stylolithes, etc.). La détermination de la cinématique de fractures observées le long d'un puits de forage peut être délicate car les fractures peuvent être interprétées comme des diaclases puisque l'on n'observe guère le cisaillement. Dans un environnement géologique qui comprend des fluides, la connaissance de la cinématique des fractures peut aider à prévoir la migration des fluides.

[00114] À titre d'exemple, une approche de l'inversion de contrainte tectonique peut comprendre un groupement des données et peut comprendre une modélisation géomécanique pour effectuer une inversion multi-phase. Dans un tel exemple, l'approche peut inverser simultanément pour un type cinématique inconnu de fractures.

[00115] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre un groupement des données et une modélisation géomécanique pour une inversion multi-phase, facultativement dans le cas où l'inversion fournit une identification d'un ou de plusieurs types cinématiques. Comme un tel procédé peut séparer des types de fracture pendant un processus d'inversion, un ingénieur en réservoir peut prévoir la répartition et l'orientation des fractures ainsi que la perméabilité des fractures à travers la masse de roche pour des simulations d'écoulement du fluide du réservoir. Par exemple, la sortie d'un procédé d'inversion peut être entrée dans un simulateur de réservoir (par ex., une infrastructure de simulation de réservoir, etc.). À titre d'exemple, la sortie d'une

infrastructure peut servir à planifier, effectuer, etc., une ou plusieurs opérations de terrain, etc.

[00116] La Figure 7 montre un exemple de procédé 710 et un exemple de système 760. Comme cela est montré, le procédé 710 comprend un bloc de réception 712 pour recevoir des données pour des fractures associées à un environnement géologique ; un bloc d'exécution 716 pour effectuer une inversion de contrainte, reposant au moins partiellement sur une partie des données et l'attribution de différents types de fracture mécanique à différentes populations de fractures et pour obtenir la contrainte tectonique ; un bloc de sortie 720 pour produire la contrainte tectonique ; et facultativement un bloc de séparation 724 pour la contrainte tectonique, pour séparer différentes populations de fractures en différents types de fracture mécanique. À titre d'exemple, une contrainte tectonique peut être une paléocontrainte ou, par exemple, associée à une activité telle qu'une fracturation artificielle (par ex., fracturation hydraulique).

[00117] À titre d'exemple, le procédé 710 peut facultativement comprendre l'application d'un ou de plusieurs critères de confiance. Dans un tel exemple, un ou plusieurs des critères de confiance peuvent comprendre un ou plusieurs paramètres associés au type de fracture mécanique. Par exemple, un critère de confiance peut comprendre un paramètre pour un premier type de fracture mécanique et un paramètre pour un deuxième type de fracture mécanique (par ex., et facultativement un ou plusieurs types de fracture mécanique supplémentaires).

[00118] Le procédé 710 peut comprendre la sortie d'une pluralité de contraintes tectoniques où chacune des contraintes tectoniques peut être associée à une phase tectonique. À titre d'exemple, le procédé 710 peut comprendre la sortie d'une contrainte tectonique associée à une première phase tectonique et la sortie d'une autre contrainte tectonique associée à une autre phase tectonique. Dans un tel exemple, le procédé 710 peut être un procédé d'inversion de contrainte polyphase ou multi-phase.

[00119] Dans le procédé 710, l'affectation de différents types de fracture mécanique à différentes populations des fractures peut comprendre l'affectation aléatoire de différents types de fracture mécanique. Par exemple, pour des fractures données (par ex., avec les données d'emplacement associées), le procédé 710 peut comprendre l'affectation aléatoire d'un premier type de fracture mécanique à un premier pourcentage des fractures et d'un deuxième type de fracture mécanique à un deuxième pourcentage des fractures. Un tel procédé peut aussi comprendre l'affectation aléatoire d'un troisième type de fracture mécanique à un troisième pourcentage des fractures, etc. À titre

d'exemple, les types de fracture mécanique peuvent comprendre une ou plusieurs fractures parmi diaclase, stylolithe et cisaillement. Par exemple, la Figure 4 montre quelques exemples d'informations d'orientation en ce qui concerne des fractures 410, qui peuvent comprendre une fracture de tension 420 (par ex., une diaclase), une fracture de cisaillement 430 et une fracture de compression 450 (par ex., une stylolithe). À titre d'exemple, on peut qualifier les fractures 420, 430 et 450 de fractures mécaniques et on peut considérer les sobriquets qui leur sont associés comme des types de fracture mécanique (par ex., tension ou diaclase, cisaillement, compression ou stylolithe, etc.). À titre d'exemple, un critère de confiance peut comprendre un ou plusieurs paramètres parmi paramètre de diaclase, paramètre de stylolithe et paramètre de cisaillement.

[00120] À titre d'exemple, les données pour les fractures peuvent comprendre des informations telles que, par exemple, des informations d'orientation. Comme cela a été mentionné, les données pour les fractures peuvent comprendre des informations telles que, par exemple, des informations d'emplacement. À titre d'exemple, les données pour les fractures peuvent comprendre des informations de pendage. À titre d'exemple, les données pour les fractures peuvent comprendre des informations d'emplacement, qui peuvent être des informations d'emplacement définies par rapport à une caractéristique d'un environnement géologique. Par exemple, les données pour les fractures peuvent définir les fractures comme étant une direction d'un côté d'une faille et peuvent définir d'autres fractures comme étant une autre direction d'un autre côté de la faille.

[00121] À titre d'exemple, le procédé 710 peut comprendre l'affectation aléatoire d'un type de fracture mécanique (par ex. x% de diaclase, y% de stylolithe et/ou [100-x-y]% de cisaillement) à N fractures pour doter trois populations différentes de fractures de différents types de fracture mécanique. Dans un tel exemple, le nombre N de fractures peut être supérieur ou égal à deux. À titre d'exemple, le procédé 710 peut comprendre l'affectation d'au moins deux types de fracture mécanique différents pour doter au moins deux populations différentes de fractures de différents types de fracture mécanique.

[00122] Sur la Figure 7, le système 760 peut comprendre un ou plusieurs processeurs 762, une mémoire 764, un ou plusieurs modules et/ou instructions 766 et d'autres caractéristiques 768 (par ex., une ou plusieurs caractéristiques de plate-forme informatique tel qu'un ordinateur de bureau, un ordinateur portable, un serveur, un poste de travail, etc.).

[00123] Le procédé 710 est représenté sur la Figure 7 en association avec divers blocs 713, 717, 721 et 725 de supports lisibles par ordinateur (CRM), qui peuvent être

un ou plusieurs modules. Ces blocs peuvent comprendre des instructions pouvant être exécutées par un ou plusieurs processeurs (ou cœurs) pour ordonner à un dispositif ou système informatique d'effectuer une ou plusieurs actions. Alors que divers blocs sont représentés, on peut configurer un support unique avec des instructions pour permettre, au moins en partie, l'exécution de diverses actions du procédé 710. À titre d'exemple, un support lisible par ordinateur (CRM) peut être un support de stockage lisible par ordinateur qui est non transitoire et non une onde porteuse.

[00124] À titre d'exemple, les types de fracture mécanique peuvent comprendre diaclase, stylolithe et cisaillement. À titre d'exemple, un procédé peut inverser pour plusieurs phases tectoniques et peut estimer le type de fracture mécanique, par exemple, dans le cas où le type peut être inconnu ou incertain pour une ou plusieurs fractures.

[00125] À titre d'exemple, un procédé peut facultativement comprendre la réception d'informations se rapportant à la géométrie de faille pour une ou plusieurs failles. À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la réception d'informations telles que, par exemple, orientation et emplacement de fracture pour au moins deux fractures. À titre d'exemple, on peut recevoir des informations supplémentaires. À titre d'exemple, les informations peuvent être unidimensionnelles, bidimensionnelles, tridimensionnelles, etc.

[00126] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la sortie de « n » phases tectoniques pour lesquelles des données inconnues de type mécanique sont obtenues et classées dans une ou plusieurs des « n » phases tectoniques.

[00127] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre, pour les fractures avec un type mécanique inconnu ou incertain, l'affectation aléatoire du type diaclase à x% des fractures, du type stylolithe à y% des fractures et du type fracture de cisaillement à (100-x-y)% des fractures.

[00128] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la sélection d'une fracture dans un groupe de fractures (par ex., une liste de données pour fractures) ; la mise en œuvre d'une inversion de contrainte mécanique avec la fracture sélectionnée comme une obligation pour obtenir une contrainte σ_R ; pour au moins une des fractures non sélectionnées, le calcul d'un coût associé à l'aide de la contrainte σ_R où plus le coût est bas meilleure est la correspondance avec le type mécanique selon σ_R ; la création d'un sous-ensemble de fractures pour lesquelles le coût est inférieur à un seuil prescrit (par ex., un seuil prescrit par l'utilisateur, un seuil par défaut, un seuil réglable, etc.) ; la mise en œuvre d'une inversion de contrainte à l'aide des fractures provenant du sous-

ensemble (par ex., pour affiner σ_R) ; et le retrait des fractures de ce sous-ensemble du groupe des fractures.

5 **[00129]** À titre d'exemple, on peut répéter le procédé susmentionné jusqu'à ce qu'un certain nombre de fractures aient été traitées, jusqu'à ce qu'il reste un certain nombre de fractures, jusqu'à ce que les fractures dans le groupe de fractures aient été traitées, etc. À titre d'exemple, un paramètre d'itération peut spécifier un nombre maximal d'itérations.

10 **[00130]** À titre d'exemple, un procédé peut comprendre le report d'un sous-ensemble (par ex., σ_R et fracture et type) dans un domaine de contrainte tectonique. Par exemple, un sous-ensemble peut être reporté comme un point où, par exemple, la dimension (par ex., ou un autre indicateur) est proportionnelle à un critère de confiance.

15 **[00131]** À titre d'exemple, dans le cas où les groupements représentent un certain nombre de phases tectoniques, un procédé peut comprendre l'opération consistant à se débarrasser de certaines informations de type de fracture (par ex., en tant que souhaitées ou applicables) et pour une phase tectonique (σ_R) individuelle, pour les fractures individuelles, obtenir le type de fracture ayant le coût le plus bas. Dans un tel exemple, si le coût est inférieur à un coût prescrit, alors la fracture avec son type peut être considérée comme étant « expliquée » par σ_R . Quand une fracture est ainsi expliquée (par ex., au niveau ou en dessous d'un certain coût, etc.), on peut la retirer du groupe de fractures. On peut qualifier un tel procédé, par exemple, d'algorithme de coût de type de fracture.

20 **[00132]** À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la sélection d'un plus grand groupement, l'application de l'algorithme de coût de type de fracture susmentionné et la répétition d'un algorithme d'inversion de contrainte tectonique, par exemple, jusqu'à ce que le nombre souhaité de fractures soient expliquées. Par exemple, si une méthode finit avec n événements tectoniques et que le maximum imposé d'événements est m (par ex., $m \leq n$), alors on peut déterminer les fractures restantes comme étant « inconnues » (par ex., ou incertaines, etc.).

30 Exemple de Pseudocode

[00133] Un exemple de pseudocode apparaît ci-dessous pour divers exemples d'algorithmes.

A. Fournir des données pour N fractures d'un type mécanique inconnu ou incertain dans un environnement géologique ;

B. Fournir des informations sur un système de failles dans l'environnement géologique ;

5 C. Trouver au moins une ou plusieurs phases tectoniques inconnues ou incertaines associées à l'environnement géologique en effectuant, par exemple, les opérations suivantes :

1. Affectation aléatoire d'un type mécanique (par ex. x% de diaclase, y% de stylolithe et/ou [100-x-y]% de cisaillement) aux N fractures

10 2. Algorithme X

a. Tant que N contient des fractures, faire :

i. Choisir 1 fracture au hasard

ii. Effectuer une inversion de contrainte $\rightarrow \sigma_R$

iii. Calculer le coût C_f pour chaque fracture f à l'aide de σ_R

15 iv. Créer un nouveau sous-ensemble S

v. Pour les fractures f

1. Si $C_f < C_{user}$ mettre f dans un sous-ensemble S

vi. EndFor

vii. Refaire l'inversion de contrainte en utilisant les fractures
provenant de S $\rightarrow \sigma_R$ affiné

20

viii. Retirer de N les fractures de S

b. EndWhile

3. Appeler l'Algorithme X n fois, où n < N est un nombre prescrit d'itérations

25

4. Les résultats comprennent M sous-ensembles, un sous-ensemble comprenant (i) la phase tectonique et (ii) un ensemble de fractures dont le type a été imposé au hasard.

5. Tracer au moins un ou plusieurs des sous-ensembles dans un domaine de contrainte, facultativement à l'aide d'un ou plusieurs critères de confiance (par ex., pour détecter des groupements, un groupement correspondant à une
30 phase tectonique détectée).

D. Séparer les types de fractures

6. Algorithme Y (par ex., optionnellement phase par phase)

a. Pour des fractures dans N

- i. Ecarter le type mécanique de chaque fracture
- ii. Pour une ou plusieurs phases tectoniques σ_R
 - 1. Pour des fractures dans N
 - a. Obtenez le type T de fracture ayant le coût le plus bas C
 - b. Si $C < C_{user}$ alors la fracture avec son type T est « expliquée » par σ_R et on peut retirer la fracture de N
 - 2. EndFor
- iii. EndFor
- b. EndFor
- 7. Si les groupements représentent convenablement les phases tectoniques
 - a. Appeler l'Algorithme Y
- 8. Sinon
 - a. Tant que N fractures ne sont pas expliquées
 - i. Sélectionner un plus grand sous-ensemble (par ex., tel qu'affiché dans le domaine de contrainte tectonique)
 - ii. Appeler l'Algorithme Y sur le sous-ensemble sélectionné et puis appeler l'Algorithme X
 - iii. Retirer le sous-ensemble de N et du domaine de contrainte
 - b. EndWhile
- 9. EndIf

[00134] À titre d'exemple, on peut appliquer un procédé à un modèle synthétique, par exemple, composé de trois phases tectoniques avec production de diaclases, fractures de cisaillement et stylolithes. À titre d'exemple, on peut appliquer un procédé à un modèle associé à un environnement géologique, par exemple, considérons un environnement tel que la dalle des Matelles (MONTPELLIER, France).

[00135] À titre d'exemple, on peut appliquer un procédé à des fractures naturelles et/ou artificielles dans un environnement géologique. À titre d'exemple, on peut appliquer un procédé à des fractures naturelles et/ou artificielles synthétiques. À titre d'exemple, on peut appliquer un procédé à des fractures qui comprennent des fractures réelles dans un environnement géologique et des fractures synthétiques, comprenant facultativement une ou plusieurs fractures hydrauliques à créer dans l'environnement géologique.

[00136] À titre d'exemple, un procédé peut mettre en œuvre l'infrastructure iBem3D™ pour bâtir un modèle qui comprend des éléments qui peuvent être résolus via une méthode des éléments finis de frontière (BEM) pour un domaine élastique isotrope et hétérogène. À titre d'exemple, on peut construire des failles comme des discontinuités 3D dans un milieu élastique homogène, le milieu lui-même pouvant, intérieurement, être manipulé sans être discrétisé (par ex., triangulé, etc.).

[00137] L'inversion de contrainte tectonique utilisant une infrastructure tel que, par exemple, l'infrastructure iBem3D™ peut appliquer un principe de superposition à l'élasticité linéaire pour des milieux d'espace entier ou de demi-espace hétérogènes, isotropes. Dans un tel exemple, étant donné des mesures d'un ou plusieurs éléments parmi rejet de faille, rejet incliné, directions de strie de glissement, mesures de contrainte, géométrie de faille, données GPS, données InSAR, fractures (par ex., diaclases, veines, dykes, couches minéralisées de dissolution par pression avec stylolithes, etc.), micro-sismicité, orientations d'éclatement ou orientations de plan de faille secondaire, l'infrastructure iBem3D peut obtenir l'état de contraintes éloignées pour de multiples événements tectoniques (par ex., par le biais de la modélisation d'un scénario mécanique complet).

[00138] À titre d'exemple, considérons un scénario dans lequel une contrainte principale est verticale ; à noter que d'autres exemples peuvent fonctionner sans un tel agencement. Dans un tel exemple, on peut définir et utiliser un domaine de contrainte tectonique pour analyser les résultats d'une inversion de contrainte.

[00139] La Figure 8 montre un exemple d'une représentation graphique d'un domaine de contrainte tectonique sous forme d'un espace des paramètres 2D qui peut couvrir diverses configurations tectoniques d'ANDERSON. Sur la représentation graphique 810, l'axe des x représente le rapport de contrainte \bar{R} (par ex., entre 0 et 3) ; tandis que l'axe des y représente l'orientation θ (par ex., entre environ 0 degré et environ 180 degrés) de la contrainte horizontale maximale définie dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport au nord. Précisément, le domaine de contrainte tectonique sur la Figure 8 illustre deux résultats de simulations d'inversion de contrainte A($\theta = 90^\circ N$, $\bar{R} = 0.5$) et B($\theta = 145^\circ N$, $\bar{R} = 0.5$). Le domaine de contrainte tectonique peut être pour une inversion polyphase où, par exemple, les points peuvent représenter les phases tectoniques obtenues après regroupement d'un ensemble de données de fractures. Par exemple, sur la représentation graphique 810 les deux points représentent deux phases tectoniques obtenues après regroupement d'un ensemble de données de fractures où

chacun des points a une superficie correspondante qui peut être définie par un critère de confiance. Par exemple, le point pour la simulation A a une surface différente de celle du point pour la simulation B. Une telle approche peut permettre une confiance déterminée d'individuellement à aisément pour une simulation, en particulier par rapport

5 à une ou plusieurs autres simulations.

[00140] Comme on l'a mentionné, à titre d'exemple, un procédé peut comprendre un regroupement des données, une inversion de contrainte et séparation des types (par ex. séparation sur le type de fracture mécanique).

10 **[00141]** À titre d'exemple, un procédé peut employer l'analyse de groupement pour la séparation des fractures. Par exemple, considérons l'analyse de groupement comme technique statistique pour identifier des groupes issus d'un échantillon. Une telle analyse peut être effectuée en une pluralité d'étapes, par exemple, en fonction de la connaissance d'un ou plusieurs types de fracture sur la longueur d'un puits, les résultats escomptés, etc.

15 **[00142]** Par exemple, un procédé peut comprendre, là où le type de données de fracture n'est pas défini, l'attribution d'un type aléatoire à des fractures individuelles dans un groupe de fractures, par exemple, selon une proportion fixe (par ex., qui peut être définie par l'utilisateur, par défaut, etc.). À titre d'exemple, considérons des proportions telles qu'un tiers de diaclases, un tiers de stylolithes et un tiers de fractures de

20 cisaillement. À titre d'exemple, dans le cas où les données pour le type de fracture existent, on peut utiliser ces données pour attribuer le type (par ex., pour au moins une partie des fractures).

[00143] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la sélection aléatoire ou autre d'une fracture (par ex., décrite en termes de pendage-azimut, angle de pendage et

25 type) et l'exécution d'une inversion de contrainte mécanique en utilisant la fracture sélectionnée comme une contrainte pour produire en sortie une contrainte tectonique.

[00144] À titre d'exemple, on peut appliquer à un modèle dans le sens avant une contrainte tectonique obtenue en sortie d'une inversion et, par exemple, on peut comparer une ou plusieurs orientations de fractures individuelles prédites à une ou

30 plusieurs fractures individuelles observées. Une telle approche peut fournir le coût de fractures restantes où, par exemple, plus le coût est faible, plus la similitude à la fracture choisie au hasard est élevée. À titre d'exemple, on peut utiliser une valeur de seuil (par ex., considérons une valeur d'environ 0,1) pour classer les fractures mécaniquement semblables dans un sous-ensemble.

[00145] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la répétition de diverses actions jusqu'à ce que la partie souhaitée des données soit regroupée en sous-ensembles. À titre d'exemple, on peut analyser séparément un ou plusieurs sous-ensembles individuels, par exemple, à l'aide d'une technique d'inversion de contrainte monphasée géomécanique. À titre d'exemple, on peut représenter une solution d'inversion de contrainte individuelle dans un domaine de contrainte tectonique, par exemple, sous la forme d'un point avec une surface, une couleur, etc., particulières. À titre d'exemple, la surface du point peut être proportionnelle à un critère de confiance reposant sur la taille d'un sous-ensemble de fractures et la diversité des types de données.

[00146] À titre d'exemple, si une ou plusieurs solutions représentées graphiquement sont considérées comme étant acceptables (par ex., par un géologue, etc.), on peut utiliser une ou plusieurs solutions de phase tectonique tracées dans une simulation en avant et comparer le tenseur des contraintes perturbé localement aux fractures provenant, par exemple, des données originales (par ex., les données reçues pour un groupe de fractures, etc.). À titre d'exemple, on peut utiliser une fonction de coût modifiée sur des plans de fracture individuelle pour déterminer un type de fracture correspondant pour au moins un des plans de fracture individuelle. Dans un tel exemple, où le coût est inférieur à une valeur seuil (par ex., considérons une valeur seuil d'environ 0,1), on peut retirer lesdites fractures identifiées des données originales (par ex., d'un groupe de fractures) et les associer à la solution de phase tectonique sélectionnée.

[00147] À titre d'exemple, là où une ou plusieurs solutions possibles sont représentées graphiquement avec les critères de confiance correspondants, on peut sélectionner une solution de contrainte tectonique (par ex., correspondant à une phase tectonique) et l'appliquer dans le sens avant. À titre d'exemple, on peut utiliser une fonction de coût modifiée sur un plan de fracture pour déterminer son type de fracture. Dans un tel exemple, là où le coût est inférieur à une valeur seuil (par ex., considérons une valeur d'environ 0,1), on peut retirer une ou plusieurs fractures identifiées par exemple d'un ensemble de données et les associer à la solution de phase tectonique sélectionnée. À titre d'exemple, un procédé peut comprendre des itérations là où diverses actions sont répétées jusqu'à ce qu'une partie souhaitée des données de fractures reçues soit associée à une ou plusieurs phases tectoniques.

[00148] À titre d'exemple, si une ou plusieurs phases tectoniques obtenues semblent irréalistes, incertaines, etc., un procédé peut comprendre l'adaptation d'une

affectation de type de fracture (par ex., en utilisant un ou plusieurs types différents, un ou plusieurs pourcentages différents, etc.).

5 **[00149]** À titre d'exemple, une approche échelonnée peut permettre une ou plusieurs des opérations suivantes : regrouper géomécaniquement les données en sous-ensembles préalablement à l'inversion de contrainte ; filtrer les résultats de l'inversion de contrainte récupérés avec un critère de confiance ; et obtenir le type mécanique de chaque fracture et l'associer à une phase tectonique.

10 **[00150]** À titre d'exemple, un critère de confiance peut comprendre des termes qui correspondent à un ou plusieurs types de caractéristiques. Par exemple, considérons un critère de confiance pour un groupement individuel de fractures qui peut être représenté comme suit :

$$Confidence_1 = \sqrt{(found_j - nb_j)^2 + (found_s - nb_s)^2 + (found_c - nb_c)^2}$$

15 où $found_{type}$ est un nombre de fractures d'un type défini regroupées en sous-ensembles et nb_{type} est un nombre de fractures dans un ensemble de données d'un type défini. À titre d'exemple, considérons le type comme étant un ou plusieurs types parmi j pour diaclases, s pour stylolithes et c pour fractures conjuguées, qu'on peut qualifier de fractures de cisaillement.

20

[00151] Un indicateur de confiance peut représenter la « distance » d'un point pour lequel les coordonnées sont définies par un nombre de données de fracture regroupées avec succès d'un nombre choisi de types ($found_{type}$) à partir d'un scénario optimal où un procédé de regroupement trouve des données de chaque type, auquel cas ce qui suit
25 peut rester valable : $Confidence_1 = 0$.

[00152] Une fois que les données sont regroupées en sous-ensembles, on peut utiliser un autre critère de confiance qui prend en considération l'hétérogénéité des types de fracture ; par exemple, considérons l'équation suivante :

30
$$Confidence_2 = \left(\frac{1}{Confidence_1 - Min_{confidence_1} + 1} \times nb_{all} \right)^2$$

où $Min_{confidence_1}$ est la valeur minimale de $Confidence_1$ pour les sous-ensembles traités et nb_{all} le nombre total de fractures dans un ensemble de données.

5 **[00153]** À titre d'exemple, on peut utiliser un troisième critère de confiance, par exemple, qui prend en compte un type de fracture manquant :

$$Confidence_3 = Confidence_2 * H$$

10 où H dépend d'un nombre de fractures de chaque type, par exemple, considérons une approche où les données comprennent trois types de fracture :

$$H = nb_j \times nb_s \times nb_c$$

15 où les données comprennent deux types de fracture :

$$H = nb_{type1} \times nb_{type2}$$

où les données comprennent un type de fracture :

20
$$H = nb_{type}$$

[00154] Si l'on se reporte à nouveau au graphique 810 de la Figure 8, deux groupements sont illustrés et correspondent à l'inversion de contrainte tectonique qui a donné des solutions géologiquement fondées ; à noter que les solutions non fondées ont été filtrées par la mise en œuvre d'un critère de confiance tels que, par exemple, $Confidence_3$.

25

[00155] La Figure 9 montre un exemple de tableau 905 et un exemple de représentation graphique 910 qui correspond à un modèle synthétique d'un environnement géologique. À titre d'exemple, on peut appliquer un procédé à un modèle synthétique et aux données associées. Par exemple, considérons un modèle synthétique qui comprend 5 failles actives qui se croisent, comme représenté sur le graphique 910 de la Figure 9 (voir, par ex., les failles de numéros 1 à 5). Dans un tel exemple, il peut y avoir trois phases tectoniques imposées au modèle comme l'expose le tableau 905 où, pour chaque phase tectonique (p. ex., d'ANDERSON) le modèle est

30

peuplé avec des caractéristiques telles que, par exemple, une population créée de façon aléatoire de 1/3 de diaclases, 1/3 de stylolithes et 1/3 de fractures de cisaillement. Sur le graphique 910, les points représentent dans l'espace de telles caractéristiques sur une grille (p. ex., en raison des failles de glissement).

5 **[00156]** Dans l'approche précédente d'un modèle synthétique, les résultats de la grille comprennent l'orientation des diaclases, stylolithes et plans de cisaillement créés de façon aléatoire, à partir de trois phases tectoniques. Pour poursuivre l'inversion de contrainte tectonique, on retire les informations sur le type mécanique de chaque fracture pour fournir un ensemble réduit d'informations.

10 **[00157]** Étant donné le modèle synthétique et les données associées, on peut appliquer un procédé pour inverser les paramètres des trois phases tectoniques (voir, par ex., le tableau 905), ainsi que, par exemple, le type d'une caractéristique. Un tel procédé peut comprendre, par exemple, la réception d'orientations et géométrie de faille et ensuite l'exécution d'un processus d'inversion pour les paramètres des trois phases tectoniques ainsi que, par exemple, le type d'une caractéristique (par ex., type de fracture mécanique, etc.).

15 **[00158]** Grâce à l'utilisation d'un modèle synthétique et des données associées, on peut examiner un procédé, par exemple, quant à sa robustesse et ses performances. Encore une fois, comme l'illustre le graphique 910, le modèle synthétique est un modèle de faille qui convient à l'inversion de contrainte polyphase et à la séparation de types. Le modèle de faille sur le graphique 910 comprend une géométrie de faille tridimensionnelle et une grille de points qui comprend 225 exemples de données de fracture créées de façon aléatoire avec type aléatoire.

20 **[00159]** La Figure 10 montre une représentation graphique 1010 d'un résultat de regroupement n'utilisant pas de critère de confiance avec une représentation graphique 1005 qui approxime les emplacements des trois phases tectoniques du tableau 905 de la Figure 9. Comme le montre le graphique 1010, la zone de points représente un certain nombre de données dans un sous-ensemble mis en groupements. Le résultat illustré sur le graphique 1010 comprend de multiples artefacts (par ex., des solutions mal fondées).

30 **[00160]** La Figure 11 montre une représentation graphique 1110 d'un résultat de regroupement utilisant le critère *Confidence₃* susmentionné avec une représentation graphique 1105 qui approxime les emplacements des trois phases tectoniques du tableau 905 de la Figure 9. Sur le graphique 1110, on peut observer (par ex., obtenir)

les trois contraintes tectoniques imposées du tableau 905 tandis que des artefacts tels qu'illustrés sur le graphique 1010 sont moins visibles.

5 **[00161]** Une analyse des informations sur le graphique 1110 démontre que le procédé appliqué a récupéré avec succès une majorité (environ 80%) des types de fracture mécanique et de leur phase tectonique respective.

[00162] Ensuite, aux fins de séparation, on applique un procédé au modèle synthétique et données associées comme sur la Figure 9 ; à noter que pour mieux représenter les résultats de la séparation des types, on applique les phases tectoniques 1 et 2 du tableau 905.

10 **[00163]** Pour imposer la première phase tectonique, $1(\theta = 90^\circ, \bar{R} = 0.5)$, un procédé comprend la création aléatoire de 1/3 de diaclases, 1/3 de stylolithes et 1/3 de fractures de cisaillement sur les points impairs de la grille représentée sur le graphique 910 de la Figure 9 (points noirs) comme étant dus aux failles de glissement ; et la seconde phase tectonique, $2(\theta = 145^\circ, \bar{R} = 1.5)$ est imposée là où des types de fracture aléatoires
15 sont créés de façon aléatoire sur les points pairs de la grille représentée sur le graphique 910 de la Figure 9.

[00164] Dans l'approche précédente, les données synthétiques sont créées à l'endroit où à chaque point de la grille sur le graphique 910 est attribuée une fracture d'un type défini de façon aléatoire qui appartient à une phase tectonique particulière où la
20 moitié des points de la grille comprennent des types de fractures créés par la phase tectonique 1, tandis que l'autre moitié comprend des types de fracture créés par la phase tectonique 2. À titre d'exemple, une fois obtenues les données synthétiques, on peut effectuer un processus de regroupement et une inversion de contrainte sur chaque sous-ensemble de données obtenues (étapes 2 à 5).

25 **[00165]** La Figure 12 montre une représentation graphique 1210 de phases tectoniques obtenues avec une représentation graphique 1205 des deux phases tectoniques utilisées pour créer les données synthétiques. Ainsi, comme le montre le graphique 1210, par le biais de regroupement et d'inversion de contrainte, on peut calculer des solutions tout en appliquant le critère de confiance. Sur le graphique 1210,
30 deux solutions principales sont obtenues ainsi qu'une solution d'artefact. Grâce à une comparaison avec le graphique 1205, on peut estimer que les deux solutions principales sont fondées car elles correspondent aux deux premières phases tectoniques du tableau 905 de la Figure 9.

[00166] Comme on peut estimer que les deux solutions sur le graphique 1210 de la Figure 12 sont fondées, on peut appliquer chacune de celles-ci, par exemple, dans une simulation vers l'avant. Grâce à une telle approche, le tenseur des contraintes localement perturbé qui en résulte peut être comparé avec les fractures provenant de l'ensemble de données. À titre d'exemple, on peut mettre en œuvre une fonction de coût là où on calcule le coût, par exemple, en calculant l'affinité du plan de fracture avec chaque type mécanique. Dans un tel exemple, là où le coût est inférieur à une valeur seuil (par ex., considérons une valeur entre environ 0,05 et environ 0,1), on peut associer une fracture (par ex., lequel type de fracture mécanique a été défini) à la solution de phase tectonique imposée. Par exemple, pour la phase tectonique 1 récupérée, si une fracture F a un coût de 0,99 en tant que diaclase, 0,55 en tant que faille de cisaillement et 0,001 en tant que stylolithe, on peut classer la fracture F considérée comme stylolithe et l'associer à la phase tectonique 1 considérée.

[00167] La Figure 13 montre deux représentations graphiques 1310 et 1330 d'un exemple de diaclases (hachures), stylolithes (hachures croisées) et fractures de cisaillement (blanc uni) créées de façon aléatoire sur une grille qui comprend 225 éléments ou points (par ex., représentés par 225 cases, voir aussi le graphique 910 de la Figure 9). Dans un tel exemple, une fracture est rattachée à une phase tectonique particulière (par ex., phase tectonique 1 ou 2 du tableau 905 de la Figure 9). Le graphique 1330 montre l'exactitude des processus de regroupement, d'inversion de contrainte et d'inversion de type de telle sorte que les hachures croisées correspondent au type mécanique récupéré avec succès associé à la phase tectonique appropriée, les hachures correspondent aux types de fracture qui n'ont pas été convenablement récupérés et qui ont été associés à la mauvaise phase tectonique, tandis que les points manquants (blanc uni) correspondent aux fractures dont le type n'a pas été défini et qui n'a pas pu être, dans l'infrastructure de limites particulières, associé à une phase tectonique particulière.

[00168] La Figure 14 montre deux représentations graphiques 1410 et 1430 d'un autre exemple, différent de diaclases (hachures), stylolithes (hachures croisées) et fractures de cisaillement (blanc uni) créées de façon aléatoire sur une grille qui comprend 225 éléments ou points (par ex., représentés par 225 cases, voir aussi le graphique 910 de la Figure 9). Dans un tel exemple, une fracture est rattachée à une phase tectonique particulière (par ex., phase tectonique 1 ou 2 du tableau 905 de la Figure 9). Le graphique 1430 montre l'exactitude des processus de regroupement, d'inversion de

contrainte et d'inversion de type de telle sorte que les hachures croisées correspondent au type mécanique récupéré avec succès associé à la phase tectonique appropriée, les hachures correspondent aux types de fracture qui n'ont pas été convenablement récupérés et qui ont été associés à la mauvaise phase tectonique, tandis que les points
5 manquants (blanc uni) correspondent aux fractures dont le type n'a pas été défini et qui n'a pas pu être, dans l'infrastructure de limites particulières, associé à une phase tectonique particulière.

[00169] Pour l'exemple de la Figure 13, une analyse des résultats démontre que 183 des 225 types de fracture ont été identifiés avec succès (hachures croisées), ce qui
10 représente un taux de réussite d'environ 81% ; 9 types de fracture sur 225, environ 4%, ont été associés au mauvais type et ainsi à la mauvaise phase tectonique (hachures) ; et environ 15% restants des fractures n'ont pas été identifiées (blanc uni).

[00170] Pour l'exemple de la Figure 14, une analyse des résultats démontre que 180 des 225 types de fracture ont été identifiés avec succès (hachures croisées), ce qui
15 représente un taux de réussite d'environ 80% ; 8 types de fracture sur 225, environ 3,5%, ont été associés au mauvais type et ainsi à la mauvaise phase tectonique (hachures) ; et environ 16,5% restants des fractures n'ont pas été identifiées (blanc uni).

[00171] À titre d'exemple, on peut appliquer un processus de validation synthétique. À titre d'exemple, la séparation de types de fracture peut dépendre du nombre de phases
20 tectoniques et de la « distance » entre les tenseurs des contraintes (par ex., dans un domaine de contrainte, etc.). À titre d'exemple, une approche pour un modèle synthétique a donné comme résultat environ 80 pour cent de fractures prises en compte en ce qui concerne les phases tectoniques tandis qu'un moindre taux d'exactitude était d'environ 40 pour cent pour des phases tectoniques relativement ambiguës (p. ex., pour
25 le régime et la proximité en termes de \bar{R} et θ), ce qui peut quand même fournir d'utiles informations.

[00172] À titre d'exemple, un procédé peut produire certains résultats d'artéfact qui pourraient correspondre à des artéfacts symétriques (par exemple, décalés de 90 degrés) ou d'une incertitude de régime (par exemple, rejet normal/horizontal pour les
30 diaclases ou rejet inverse/horizontal pour les stylolithes). Dans un tel exemple, un utilisateur peut sélectionner ou régler un ou plusieurs critères pour différencier les phases tectoniques réelles des résultats d'artéfact.

[00173] À titre d'exemple, dans le cas où les phases tectoniques sont proches (par ex., dans un espace de domaine), la séparation de phase pourrait donner un résultat

particulier. À titre d'exemple, lorsque l'approximation de type de fracture pour le regroupement de données manque de certitude, de réalisme, etc., la précision de séparation de type de fracture peut se réduire, par exemple, proportionnellement au nombre de phases tectoniques. À titre d'exemple, là où certains types de fracture sont connus, on peut utiliser de telles informations pour forcer le regroupement des données.

[00174] À titre d'exemple, la modélisation de contraintes et de fractures peut comprendre l'utilisation d'un principe de superposition. À titre d'exemple, étant donné diverses données d'entrée, telles que géométrie de faille, et des ensembles de données ou mesures de données sélectionnables ou facultatives, comprenant un ou plusieurs éléments parmi glissement de faille, directions de rejet incliné ou de stries de glissement, mesures de contrainte, données de fractures, orientations secondaires de plan de faille, données du système mondial de localisation (GPS), données d'interférométrie par radar à synthèse d'ouverture (InSAR), données géodésiques provenant de clinomètres de surface, télémétrie par laser, etc., un système peut créer ou obtenir des informations de contrainte et/ou rattachées à la contrainte. À titre d'exemple, les données d'entrée peuvent être facultativement tirées d'une ou plusieurs sources parmi données de puits de forage, interprétation sismique, observation sur le terrain, etc.

[00175] À titre d'exemple, là où existent plusieurs événements tectoniques, un procédé peut comprendre la récupération d'un ou plusieurs des événements (par ex., une phase tectonique, etc.). À titre d'exemple, un régime tectonique et/ou l'orientation et/ou magnitude peuvent sensiblement différer d'un événement à l'autre.

[00176] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre l'exécution d'une inversion de contrainte pour obtenir la contrainte tectonique et, par exemple, l'attribution d'un coût aux points individuels d'observation pour montrer la confiance en la contrainte tectonique récupérée par rapport aux données attachées à ce point d'observation. À titre d'exemple, un coût nul peut indiquer un niveau acceptable de confiance tandis qu'un coût de 1 peut indiquer un niveau inacceptable de confiance. À titre d'exemple, en sélectionnant les points de données qui sont sous une valeur seuil donnée et en effectuant une autre inversion de contrainte avec ces points, il peut être possible d'extraire une valeur de contrainte tectonique plus précise. À titre d'exemple, on peut utiliser les points de données restants au-dessus de la valeur seuil pour effectuer une autre inversion de contrainte, par exemple, dans un effort pour obtenir un autre événement tectonique.

[00177] Comme cela a été mentionné, un procédé peut comprendre une approche basée sur les éléments telle que, par exemple, une approche reposant sur une méthode

des éléments finis de frontière (BEM). À titre d'exemple, une approche BEM peut pourvoir au calcul de déplacements, de déformations et de contraintes induites dans un espace entier ou un demi-espace élastique. Dans un tel exemple, les éléments de contour peuvent être triangulaires (par ex., des éléments plans en forme de triangle de discontinuité de déplacement). À titre d'exemple, de tels éléments peuvent être construits par superposition de dislocations angulaires.

[00178] À titre d'exemple, les champs élastiques autour des éléments peuvent être tirés d'une solution pour une dislocation angulaire unique dans un demi-espace ou un espace entier élastique. Géologiquement, un élément triangulaire peut représenter une certaine partie d'une surface de fracture ou de faille à travers laquelle une discontinuité de déplacement est approximativement constante. À titre d'exemple, on peut utiliser plusieurs éléments de dislocation triangulaires pour modéliser des failles ou des fractures ; à noter que certains peuvent être assemblés pour constituer une surface fermée qui peut représenter un corps élastique fini ou un vide dans un corps élastique par ailleurs infini ou semi-infini. Une telle superposition peut pourvoir à la modélisation de structures géologiques avec diverses frontières et formes 3D, qui peuvent ne pas se prêter à la modélisation avec éléments rectangulaires car des surfaces courbes peuvent entraîner des vides et/ou des chevauchements.

[00179] La Figure 15 montre un exemple de scénario 1500 de construction d'une géométrie de faille à l'aide d'éléments triangulaires et une représentation schématique d'une grille d'observation environnante. En particulier, un demi-espace 1510 comprend des propriétés matérielles 1512 et une discontinuité 1520 (par ex., une surface de faille). Les conditions de frontière 1540 sur les éléments triangulaires peuvent être une combinaison de conditions 1542 de discontinuité de déplacement et de conditions 1544 de traction, par exemple, définies dans un système de coordonnées d'éléments. À titre d'exemple, un système de coordonnées d'éléments peut être tel que les axes des x et y soient respectivement suivant les orientations du pendage et de la direction. Dans un tel exemple, l'axe des z peut être aligné avec la perpendiculaire à un élément. En des points d'observation individuelle, on peut calculer des déplacements 1562 et des contraintes et déformations 1564 (par ex., facultativement en tant que post-processus). La Figure 15 montre aussi la déformation ou contrainte éloignée 3D (par ex., effets de champ éloigné).

[00180] Comme l'illustre la Figure 15, les conditions aux limites peuvent être définies comme une surface doublement triangulée (par ex., une pour chaque zone ou côté d'une discontinuité) qui coïncident avec les vecteurs normaux dans des directions

opposées. À titre d'exemple, une zone peut être caractérisée par un matériau homogène et isotrope et les modules d'élasticité peuvent différer d'une zone à l'autre. Une interface entre deux zones différentes peut transmettre l'influence mécanique d'une zone sur l'autre, par exemple, en calculant les vecteurs de BURGERS correspondants pour deux
5 éléments adjacents sur l'interface à l'aide des conditions de continuité et d'équilibre prescrites dans un système global de coordonnées (par ex., différentes zones peuvent être reliées par les conditions de continuité et d'équilibre au niveau d'une interface).

[00181] Par exemple, un procédé peut comprendre la récupération de la répartition des glissements sur un ou plusieurs failles 3D, par exemple, sur la base des mesures de
10 déplacements du sol (par ex., à partir de système mondial de localisation (GPS), interférométrie par radar à synthèse d'ouverture (InSAR), etc.), facultativement associées à un ou plusieurs événements tectoniques tels que les tremblements de terre, etc. Par exemple, on peut mettre en œuvre une méthode indirecte des éléments finis de frontière pour une inversion. À titre d'exemple, on peut mettre en œuvre une approche pondérée
15 par les moindres carrés combinée à une régularisation TIKHONOV. À titre d'exemple, on peut résoudre un système d'équations avec un solveur contraint pour créer une solution.

[00182] À titre d'exemple, les contraintes peuvent permettre aux composants de glissement de s'inverser pour être soit négatifs soit positifs. À titre d'exemple, une
20 formulation vers l'avant peut être étendue à une inversion de glissement linéaire. Dans un tel exemple, on peut mettre en œuvre des éléments triangulaires, par exemple, pour réduire le risque de vides et de chevauchements entre éléments adjacents, ce qui peut conduire à des artefacts numériques (par ex., comme cela peut exister avec des éléments rectangulaires). Par exemple, un procédé peut mettre en œuvre des éléments
25 triangulaires pour modéliser des informations à proximité d'une faille.

[00183] Par exemple, un procédé peut, compte tenu de données qui contraignent la géométrie de faille, ainsi que les conditions aux limites sur les éléments qui composent une faille, comprendre la détermination de la contrainte ou la déformation distante à
30 appliquer à un modèle. Par exemple, à l'aide d'un double système couplé itérativement, on peut estimer la contrainte tectonique compte tenu des mesures de discontinuité de déplacement sur au moins certaines parties de failles. À titre d'exemple, des mesures de rejet vertical et/ou de rejet incliné peuvent être disponibles à partir de l'interprétation de la sismique réflexion.

[00184] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre une inversion pour contrainte tectonique. Dans un tel exemple, le procédé peut obtenir (par ex., simultanément) les discontinuités inconnues de déplacement sur les failles. Une telle approche peut permettre d'étendre la géométrie de la faille, si on le souhaite, et de calculer les rejets en profondeur et décrochements inconnus.

[00185] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre l'exécution d'une analyse de contrainte tectonique par le biais du principe de superposition qui peut s'appliquer à l'élasticité linéaire pour des milieux d'espace entier ou de demi-espace hétérogènes, isotropes. À titre d'exemple, étant donné certaines mesures de rejet de faille, rejet incliné, directions de strie de glissement, mesures de contrainte, ainsi que de géométrie de faille, données GPS, données InSAR, fractures (diaclasses, veines, dykes, couches minéralisées de dissolution par pression avec stylolithes), micro-sismicité, orientations d'éclatement ou orientations de plan de faille secondaire, un procédé peut comprendre la récupération de l'état de contraintes éloignées pour de multiples événements tectoniques (par ex., par l'utilisation efficace d'un scénario mécanique). À titre d'exemple, dans une mise en œuvre du principe de superposition, on peut effectuer une simulation individuelle en temps constant. À titre d'exemple, un procédé peut comprendre l'exécution d'une ou plusieurs simulations de Monte-Carlo.

[00186] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la mise en œuvre d'une technique de matrice H pendant le calcul d'un préconditionneur. Une approche par matrice H peut comprendre la constitution d'une matrice en plusieurs blocs tels que les influences des blocs en champ proche sont conservés tandis que les blocs en champ éloigné peuvent être approchés par interpolation ou réduction de rang. À titre d'exemple, on peut choisir une règle géométrique pour l'groupement. À titre d'exemple, on peut appliquer une règle de fractionnement récursif en deux parties. Dans un tel exemple, à l'aide d'un arbre k-d, on peut appliquer une subdivision par bissection de façon récursive, menant à un arbre binaire de blocs avec une racine. À titre d'exemple, une subdivision récursive peut se terminer quand le nombre d'éléments dans un bloc atteint un minimum prescrit. Un résultat peut être une partition binaire du modèle fait de blocs. Étant donné un tel résultat, un procédé peut comprendre la détermination des blocs en champ proche et en champ éloigné à l'aide de cette décomposition.

[00187] Par exemple, une approche par matrice H peut commencer à la racine d'un arbre et créer comme structure une matrice H. Dans un tel exemple, au moins une partie des blocs peuvent être réputés être proches et au moins une partie des blocs peuvent

être réputés être éloignés. À titre d'exemple, considérant que des parties éloignées d'un modèle donnent quelques blocs approchés, un procédé peut comprendre l'hypothèse que la contribution de ces blocs peut être négligée pendant le calcul d'un préconditionneur.

5 **[00188]** À titre d'exemple, un solveur linéaire peut utiliser une méthode directe ou une méthode itérative pour déterminer une solution. Pour ce qui est de la méthode directe, considérons une élimination de GAUSS où une matrice est factorisée en produit d'une matrice triangulaire inférieure, L, et d'une matrice triangulaire supérieure, U (par ex., $A = LU$). Pour de grandes matrices creuses, le calcul des matrices triangulaires L et
10 U peut devenir coûteux lorsque le nombre d'entrées non nulles dans chaque facteur devient important.

[00189] À titre d'exemple, pour une méthode itérative, on peut résoudre un système linéaire d'équations au moyen d'approximations à une matrice. Par exemple, on peut utiliser une factorisation inférieure-supérieure incomplète ISI au lieu d'une factorisation
15 complète comme dans la méthode directe. Dans un tel exemple, on peut calculer le produit de facteurs creux L et U de telle sorte que leur produit se rapproche de la matrice ($A \approx LU$). Quand on emploie une méthode itérative, on met à jour une solution de manière itérative jusqu'à ce que la convergence soit atteinte (par ex., on a rencontré quelque(s) limite(s) d'erreur proscrite(s)). Pour de grands systèmes d'équations linéaires, les
20 méthodes itératives peuvent converger lentement parce que le nombre d'itérations peut augmenter lorsque le nombre d'inconnues augmente.

[00190] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la réception d'un modèle à éléments finis de frontière qui comprend des éléments de contour qui peuvent être numérotés de 0 à N et la formulation d'un système d'équations pour les éléments ou un
25 tableau $N \times N$ (par ex., une matrice $N \times N$) peut être dense en ce sens qu'il comprend des termes d'interaction où un élément de contour individuel interagit avec d'autres éléments de contour individuels. Un tel procédé peut comprendre la résolution itérative d'un système d'équations pour produire en sortie une solution et, par exemple, effectuer dans l'environnement géologique une ou plusieurs opérations reposant au moins en partie sur
30 la solution. Par exemple, une opération peut comprendre une opération de forage, une opération de fracturation, une opération d'extraction, une opération d'injection, etc.

[00191] À titre d'exemple, un procédé ou une partie de celui-ci peut faire partie d'un flux de traitement. Par exemple, là où un environnement géologique comprend un réservoir, on peut exécuter le procédé comme partie d'un flux de traitement pour

développer le réservoir (par ex., via les opérations sur le terrain, etc.). À titre d'exemple, le développement d'un réservoir peut comprendre l'extraction d'une ou plusieurs ressources (par ex., hydrocarbures, etc.) du réservoir.

5 **[00192]** À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la résolution d'un système d'équations formulées selon la BEM pour produire en sortie une solution et effectuer une opération reposant au moins en partie sur la solution.

10 **[00193]** À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la réception d'un système d'équations avec des variables associées qui décrit des phénomènes physiques associés à une formation géologique ; la représentation d'une matrice pour le système d'équations ; et la résolution du système d'équations.

15 **[00194]** À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la réception d'un système d'équations avec des variables associées qui décrit des phénomènes physiques associés à une formation géologique, où le système d'équations comprend des coordonnées associées aux éléments d'un modèle à éléments finis de frontière. À titre d'exemple, les éléments peuvent comprendre des éléments de contour qui représentent une surface. Par exemple, considérons une surface qui correspond à une discontinuité qui délimite au moins deux zones.

20 **[00195]** À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la réception d'un système d'équations avec des variables associées qui décrit des phénomènes physiques associés à une formation géologique, où le système d'équations comprend des coordonnées associées aux éléments d'un modèle à éléments finis.

25 **[00196]** À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la réception de données pour des fractures associées à un environnement géologique ; la mise en œuvre d'une inversion de contrainte, reposant au moins partiellement sur une partie des données et l'attribution de différents types de fracture mécanique à différentes populations de fractures, pour obtenir la contrainte tectonique ; et la production en sortie de la contrainte tectonique. Dans un tel exemple, les données pour les fractures peuvent comprendre des données pour une ou plusieurs fractures naturelles et/ou des données pour une ou plusieurs fractures artificielles. À titre d'exemple, une ou plusieurs fractures artificielles
30 peuvent comprendre au moins une fracture hydraulique dans un environnement géologique. À titre d'exemple, une ou plusieurs fractures artificielles peuvent comprendre au moins une fracture hydraulique projetée à créer dans un environnement géologique.

[00197] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre le calcul d'un indicateur de confiance reposant au moins en partie sur différents types de fracture mécanique et, par

exemple, l'association de la contrainte tectonique à l'indicateur de confiance. Pour ce qui est des différents types de fracture mécanique, considérons, par exemple, un groupe qui comprend une ou plusieurs fractures parmi diaclases, stylolithes et fractures de cisaillement.

5 **[00198]** À titre d'exemple, un procédé peut comprendre le rendu d'un relèvement sur un affichage, dans lequel le relèvement comprend une représentation de la contrainte tectonique. Dans un tel exemple, la représentation de la contrainte tectonique peut dépendre au moins en partie d'un indicateur de confiance. Par exemple, considérons un graphique dans un espace de domaine où une caractéristique d'un marqueur (par ex.,
10 taille, couleur, etc.) dépend au moins en partie d'un indicateur de confiance.

[00199] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre l'exécution d'une simulation avant reposant au moins en partie sur la contrainte tectonique pour produire en sortie un tenseur des contraintes localement perturbé. Par exemple, la contrainte tectonique telle qu'associée à un environnement géologique peut être le résultat d'une technique
15 d'inversion et une simulation avant peut produire en sortie un tenseur des contraintes localement perturbé pour au moins une partie de l'environnement géologique. À titre d'exemple, un procédé peut comprendre, au moins partiellement sur la base du tenseur des contraintes localement perturbé, l'attribution d'au moins une partie des fractures dans l'environnement géologique à un type de fracture mécanique. Dans un tel exemple,
20 l'attribution peut comprendre le calcul d'une fonction de coût reposant au moins en partie sur l'orientation du plan de fracture associée au tenseur des contraintes localement perturbé et au type de fracture mécanique.

[00200] À titre d'exemple, un procédé peut comprendre l'exécution d'une inversion de contrainte, reposant au moins partiellement sur une partie des données et l'attribution
25 de différents types de fracture mécanique à différentes populations de fractures, pour obtenir la contrainte tectonique, où ladite contrainte tectonique correspond à une phase tectonique. Dans un tel exemple, le procédé peut comprendre la répétition de l'exécution de l'inversion de contrainte pour obtenir la contrainte tectonique qui correspond à une phase tectonique différente. À titre d'exemple, un procédé peut comprendre la
30 production en sortie de contraintes tectoniques pour de multiples phases tectoniques.

[00201] À titre d'exemple, un système peut comprendre un processeur ; une mémoire ; et un ou plusieurs modules stockés dans la mémoire, dans lequel lesdits modules comprennent des instructions exécutables par processeur pour donner des instructions au système dans lequel les instructions comprennent des instructions pour

recevoir des données pour des fractures associées à un environnement géologique ; effectuer une inversion de contrainte, reposant au moins partiellement sur une partie des données et l'attribution de différents types de fracture mécanique à différentes populations de fractures, pour obtenir la contrainte tectonique ; et produire en sortie la

5 contrainte tectonique. Un tel exemple peut comprendre des instructions pour calculer un indicateur de confiance qui dépend au moins en partie d'un ou plusieurs types de fracture mécanique. À titre d'exemple, un système peut comprendre des instructions pour séparer au moins une partie des fractures en populations de différents types de fracture mécanique.

10 **[00202]** À titre d'exemple, un ou plusieurs supports de stockage lisibles par ordinateur peuvent comprendre des instructions exécutables par processeur pour donner des instructions à un système de calcul dans lequel les instructions comprennent des instructions pour recevoir des données pour des fractures associées à un environnement

15 géologique ; effectuer une inversion de contrainte, reposant au moins partiellement sur une partie des données et l'attribution de différents types de fracture mécanique à différentes populations de fractures, pour obtenir la contrainte tectonique ; et produire en sortie la contrainte tectonique. Un tel exemple peut comprendre des instructions pour calculer un indicateur de confiance qui dépend au moins en partie d'un ou plusieurs types de fracture mécanique. À titre d'exemple, un ou plusieurs supports de stockage lisibles

20 par ordinateur peuvent comprendre des instructions pour séparer au moins une partie des fractures en populations de différents types de fracture mécanique (par ex., diaclases, stylolithes, fractures de cisaillement, etc.).

[00203] La Figure 16 montre les composants d'un exemple de système informatique 1600 et un exemple de système en réseau 1610. Le système 1600

25 comprend un ou plusieurs processeurs 1602, une mémoire et/ou des composants de stockage 1604, un ou plusieurs périphériques d'entrée et/ou de sortie 1606 et un bus 1608. Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, les instructions peuvent être stockées dans un ou plusieurs supports lisibles par ordinateur (par ex., mémoire/composants de stockage 1604). De telles instructions peuvent être lues par un

30 ou plusieurs processeurs (par ex., le(s) processeur(s) 1602) via un bus de communication (par ex., le bus 1608), qui peut être filaire ou sans fil. Lesdits processeurs peuvent exécuter ces instructions pour mettre en œuvre (en totalité ou en partie) un ou plusieurs attributs (par ex., comme partie d'un procédé). Un utilisateur peut visualiser les sorties d'un processus et interagir avec lui via un périphérique d'E/S (par exemple, le

périphérique 1606). Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, un support lisible par ordinateur peut être un composant de stockage tel qu'un périphérique physique de stockage en mémoire, par exemple, une puce, une puce sur un paquet, une carte mémoire, etc. (par ex., un support de stockage lisible par ordinateur).

5 **[00204]** Dans un mode de réalisation à titre d'exemple, les composants peuvent être répartis, comme dans le système de réseau 1610. Le système de réseau 1610 comprend des composants 1622-1, 1622-2, 1622-3, ..., 1622-N. Par exemple, les composants 1622-1 peuvent comprendre le(s) processeur(s) 1602 tandis que le(s) composant(s) 1622-3 peuvent comprendre une mémoire accessible par le(s)
10 processeur(s) 1602. En outre, le(s) composant(s) 1602-2 peuvent comprendre un périphérique d'E/S pour l'affichage et facultativement l'interaction avec un procédé. Le réseau peut être l'Internet ou comprendre Internet, un intranet, un réseau cellulaire, un réseau par satellite, etc.

[00205] À titre d'exemple, un périphérique peut être un dispositif mobile qui
15 comprend une ou plusieurs interfaces réseau pour communiquer des informations. Par exemple, un dispositif mobile peut comprendre une interface réseau sans fil (par ex., pouvant fonctionner via IEEE 802.11, GSM IENT, BLUETOOTH®, satellite, etc.). À titre d'exemple, un dispositif mobile peut comprendre des composants tels qu'un processeur principal, une mémoire, un affichage, une carte graphique d'affichage (par ex.,
20 comprenant facultativement des circuits tactiles et gestuels), un logement SIM, des circuits audio/vidéo, des circuits de traitement de mouvement (par ex., accéléromètre, gyroscope), une carte réseau sans fil, des circuits de carte à puce, des circuits d'émetteur, des circuits GPS et une batterie. À titre d'exemple, un dispositif mobile peut être configuré en téléphone cellulaire, en tablette, etc. À titre d'exemple, on peut mettre
25 en œuvre un procédé (par ex., en totalité ou en partie) à l'aide d'un dispositif mobile. À titre d'exemple, un système peut comprendre un ou plusieurs dispositifs mobiles.

[00206] À titre d'exemple, un système peut être un environnement à traitement réparti, par exemple, un environnement dit « cloud » où divers dispositifs, composants, etc. interagissent à des fins de stockage de données, de communications, de calcul, etc.
30 À titre d'exemple, un dispositif ou un système peut comprendre un ou plusieurs composants pour la communication d'informations par le biais d'un ou plusieurs moyens parmi l'Internet (par ex., où la communication se fait via un ou plusieurs protocoles Internet), un réseau cellulaire, un réseau par satellite, etc. À titre d'exemple, on peut

mettre en œuvre un procédé dans un environnement à traitement réparti (par ex., en totalité ou en partie en tant que service basé sur le *cloud*).

[00207] À titre d'exemple, on peut entrer des informations à partir d'un écran d'affichage (p. ex., considérons un écran tactile), les produire en sortie sur un écran d'affichage ou les deux. À titre d'exemple, on peut produire en sortie des informations sur un projecteur, un dispositif laser, une imprimante, etc., de telle sorte que les informations puissent être visualisées. À titre d'exemple, on peut produire en sortie des informations en stéréographie ou en holographie. Pour ce qui est de l'imprimante, considérons une imprimante 2D ou 3D. À titre d'exemple, une imprimante 3D peut comprendre une ou plusieurs substances qu'on peut produire en sortie pour construire un objet 3D. Par exemple, on peut fournir des données à une imprimante 3D pour construire une représentation 3D d'une formation souterraine. À titre d'exemple, on peut construire des couches en 3D (par ex., des horizons, etc.), des géocorps en 3D, etc. À titre d'exemple, on peut construire des trous, des fractures, etc., en 3D (par ex., en tant que structures positives, en tant que structures négatives, etc.).

[00208] Bien que seulement quelques modes de réalisation à titre d'exemple aient été décrits en détail ci-dessus, l'homme du métier comprendra aisément que l'on peut apporter de nombreuses modifications aux modes de réalisation à titre d'exemple. En conséquence, toutes ces modifications ont vocation à être incluses dans la portée de cette description telle que définie dans les revendications qui suivent. Dans les revendications, les clauses de moyens-plus-fonction sont destinées à couvrir les structures décrites dans la présente comme remplissant la fonction détaillée et non seulement des équivalents structuraux, mais aussi des structures équivalentes. Ainsi, bien qu'un clou et une vis puissent ne pas être des équivalents structuraux en ce qu'un clou utilise une surface cylindrique pour fixer ensemble des pièces de bois, tandis qu'une vis utilise une surface hélicoïdale, dans l'environnement de la fixation de pièces de bois, un clou et une vis peut être des structures équivalentes. C'est l'intention expresse du demandeur de ne pas invoquer l'article 35 U.S.C. § 112, paragraphe 6 pour toutes limitations de l'une quelconque des revendications en annexe, à l'exception de celles dans lesquelles la revendication utilise expressément les mots « moyen pour » avec une fonction associée.

Revendications

1. Procédé (710) comprenant:
 - 5 une réception de données pour des fractures dans un environnement géologique (712) ;
 - une attribution d'une pluralité de types de fracture mécanique à différentes populations de fractures pour obtenir des types de fracture mécanique attribués, les types de fracture mécanique comprenant une fracture de tension, une fracture de
 - 10 cisaillement et une fracture de compression (716);
 - une mise en œuvre d'une inversion de contrainte, utilisant au moins une partie des données et les types de fracture mécanique attribués pour obtenir une contrainte tectonique (716) ;
 - une exécution d'une simulation avant, utilisant la contrainte tectonique, pour
 - 15 produire un tenseur des contraintes localement perturbé ; et
 - une attribution, sur la base du tenseur des contraintes localement perturbé, d'un type de fracture mécanique parmi la pluralité de types de fracture mécanique à au moins une partie des fractures.
 - 20 2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les données pour des fractures comprennent des données pour une ou plusieurs fractures naturelles.
 3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel les données pour des fractures comprennent des données pour une ou plusieurs fractures artificielles.
 - 25 4. Procédé selon la revendication 3, dans lequel lesdites fractures artificielles comprennent au moins une fracture hydraulique dans l'environnement géologique.
 5. Procédé selon la revendication 3, dans lequel lesdites fractures artificielles
 - 30 comprennent au moins une fracture hydraulique proposée à créer dans l'environnement géologique.

6. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre un calcul d'un indicateur de confiance basé au moins en partie sur les différents types de fracture mécanique.
- 5 7. Procédé selon la revendication 6, comprenant en outre une association de la contrainte tectonique avec l'indicateur de confiance.
8. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre un rendu d'une représentation graphique sur un écran d'affichage, dans lequel la représentation
10 graphique comprend une représentation de la contrainte tectonique.
9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel la représentation de la contrainte tectonique dépend au moins en partie d'un indicateur de confiance.
- 15 10. Procédé selon la revendication 9, dans lequel l'attribution comprend un calcul d'une fonction de coût basée au moins en partie sur l'orientation du plan de fracture associée au tenseur des contraintes localement perturbé et au type de fracture mécanique.
- 20 11. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la contrainte tectonique correspond à une phase tectonique et comprenant en outre une répétition de la mise en œuvre de la contrainte pour obtenir une contrainte tectonique qui correspond à une phase tectonique différente.
- 25 12. Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre une production en sortie de contraintes tectoniques pour de multiples phases tectoniques.
13. Système (760) comprenant :
- 30 un processeur (762) ;
une mémoire (764) ; et
un ou plusieurs modules (766) stockés dans la mémoire, dans lequel lesdits modules comprennent des instructions exécutables par processeur pour donner des instructions au système, dans lequel les instructions comprennent des instructions pour :

recevoir des données pour des fractures dans un environnement géologique (713) ;

attribuer une pluralité de types de fracture mécanique à différentes populations de fractures pour obtenir des types de fracture mécanique attribués, les types de fracture mécanique comprenant une fracture de tension, une fracture de cisaillement et une fracture de compression;

effectuer une inversion de contrainte, utilisant au moins une partie des données et les types de fracture mécanique attribués, pour obtenir une contrainte tectonique (717) ;

exécuter une simulation avant, utilisant la contrainte tectonique, pour produire un tenseur des contraintes localement perturbé ; et

attribuer, sur la base du tenseur des contraintes localement perturbé, un type de fracture mécanique parmi la pluralité de types de fracture mécanique à au moins une partie des fractures.

15

14. Système selon la revendication 13, comprenant en outre des instructions pour calculer un indicateur de confiance qui dépend au moins en partie d'un ou plusieurs types de fracture mécanique.

20

15. Système selon la revendication 13, comprenant en outre des instructions pour séparer au moins une partie des fractures en populations de différents types de fracture mécanique.

25

16. Support ou supports de stockage lisibles par ordinateur comprenant des instructions exécutables par processeur pour donner des instructions à un système de calcul dans lequel les instructions comprennent des instructions pour

recevoir des données pour des fractures dans un environnement géologique (713) ;

30

attribuer une pluralité de types de fracture mécanique à différentes populations de fractures pour obtenir des types de fracture mécanique attribués, les types de fracture mécanique comprenant une fracture de tension, une fracture de cisaillement et une fracture de compression;

effectuer une inversion de contrainte, utilisant au moins une partie des données et les types de fracture mécanique attribués pour obtenir la contrainte tectonique (717) ;

5 exécuter une simulation avant, utilisant la contrainte tectonique, pour produire en sortie un tenseur des contraintes localement perturbé ; et

attribuer, sur la base du tenseur des contraintes localement perturbé, un type de fracture mécanique parmi la pluralité de types de fracture mécanique à au moins une partie des fractures.

10 17. Support ou supports de stockage lisibles par ordinateur selon la revendication 16, comprenant en outre des instructions pour calculer un indicateur de confiance qui dépend au moins en partie d'un ou plusieurs types de fracture mécanique.

15 18. Support ou supports de stockage lisibles par ordinateur selon la revendication 16, comprenant en outre des instructions pour séparer au moins une partie des fractures en populations de différents types de fracture mécanique.

1 / 16

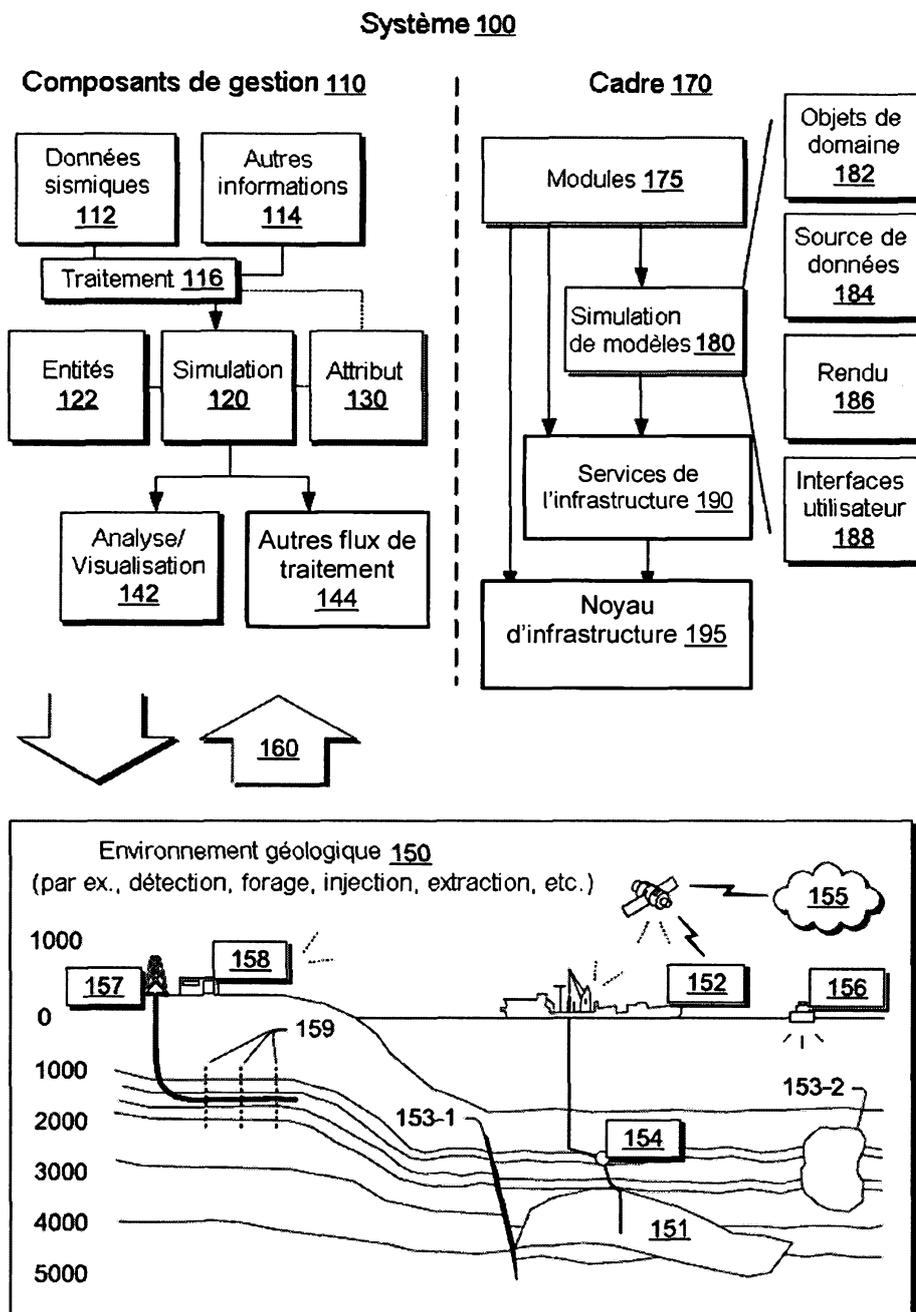


Fig. 1

2 / 16

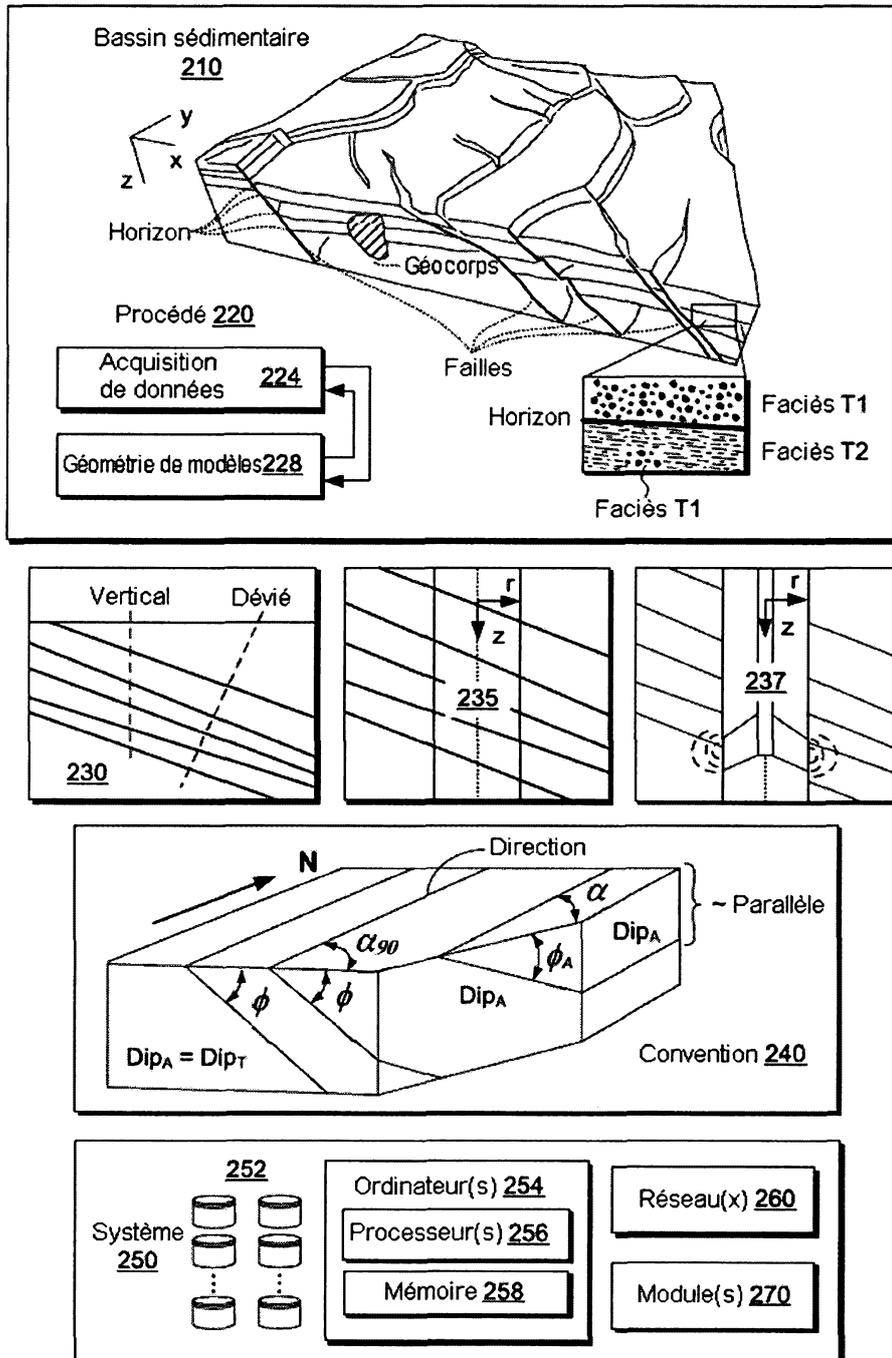


Fig. 2

3/16

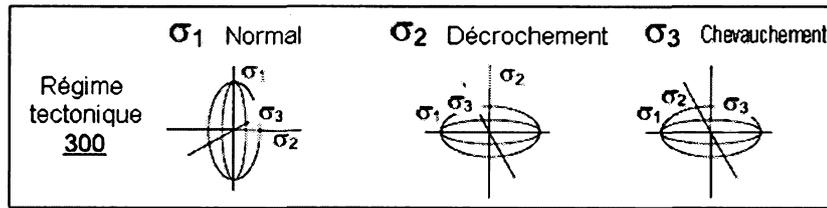
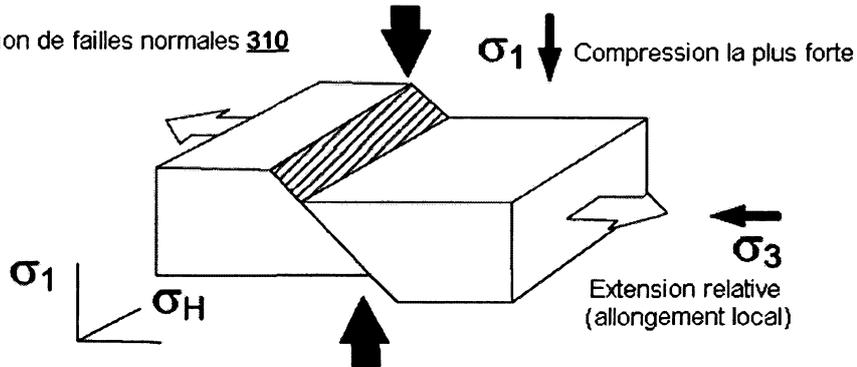
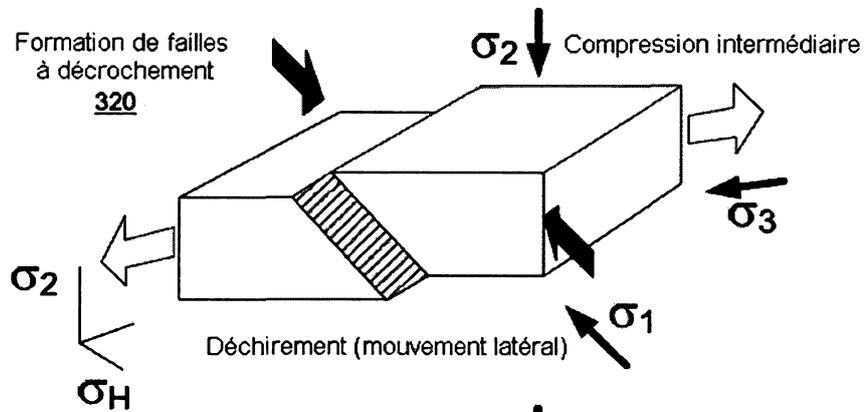
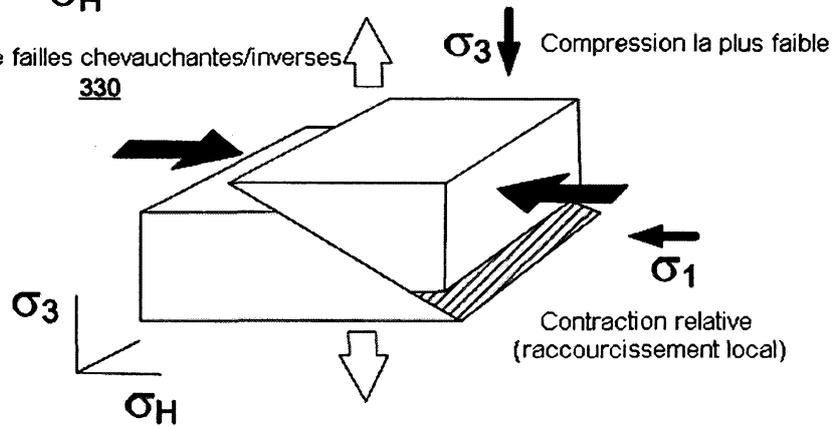
Formation de failles normales 310Formation de failles à décrochement 320Formation de failles chevauchantes/inverses 330

Fig. 3

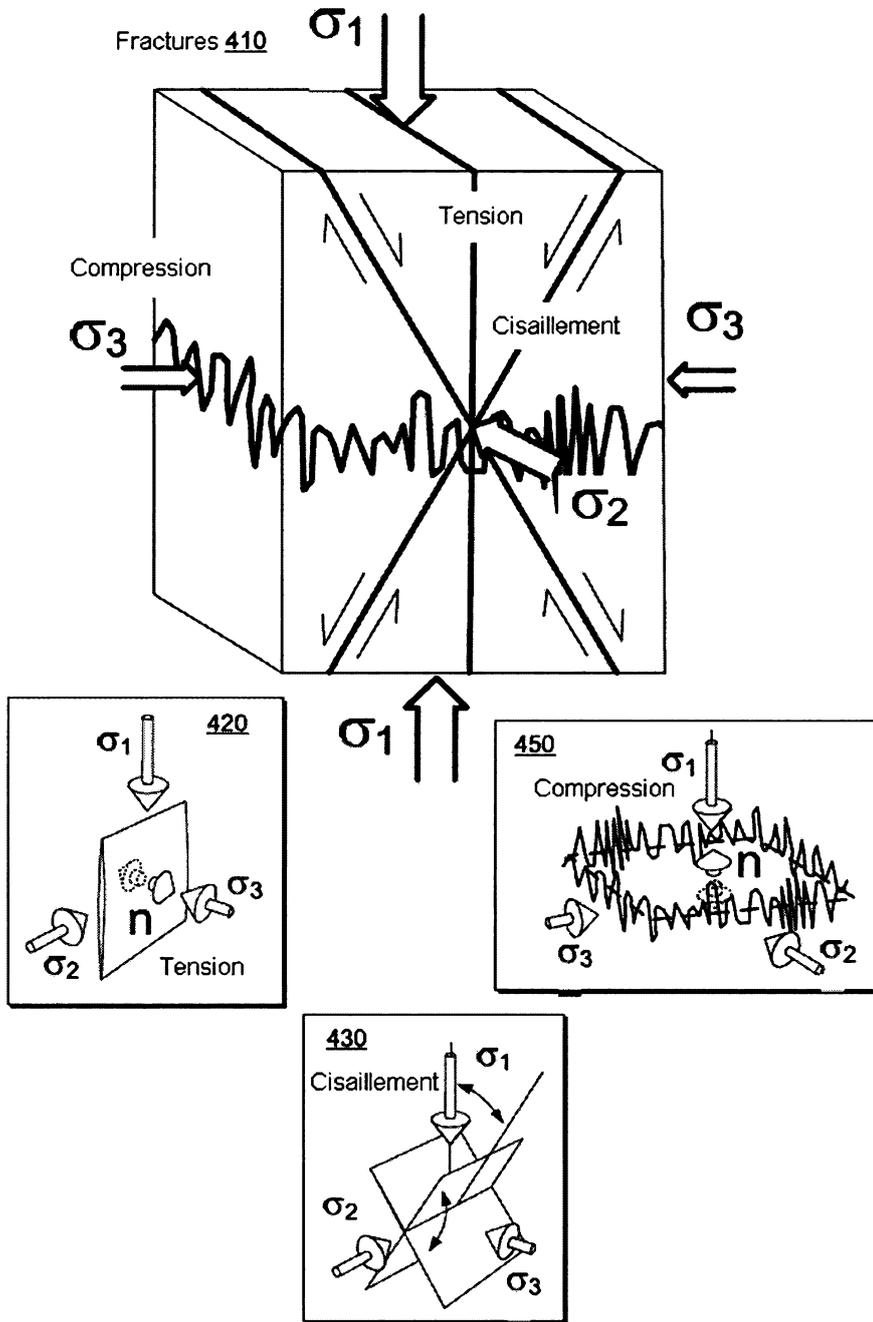


Fig. 4

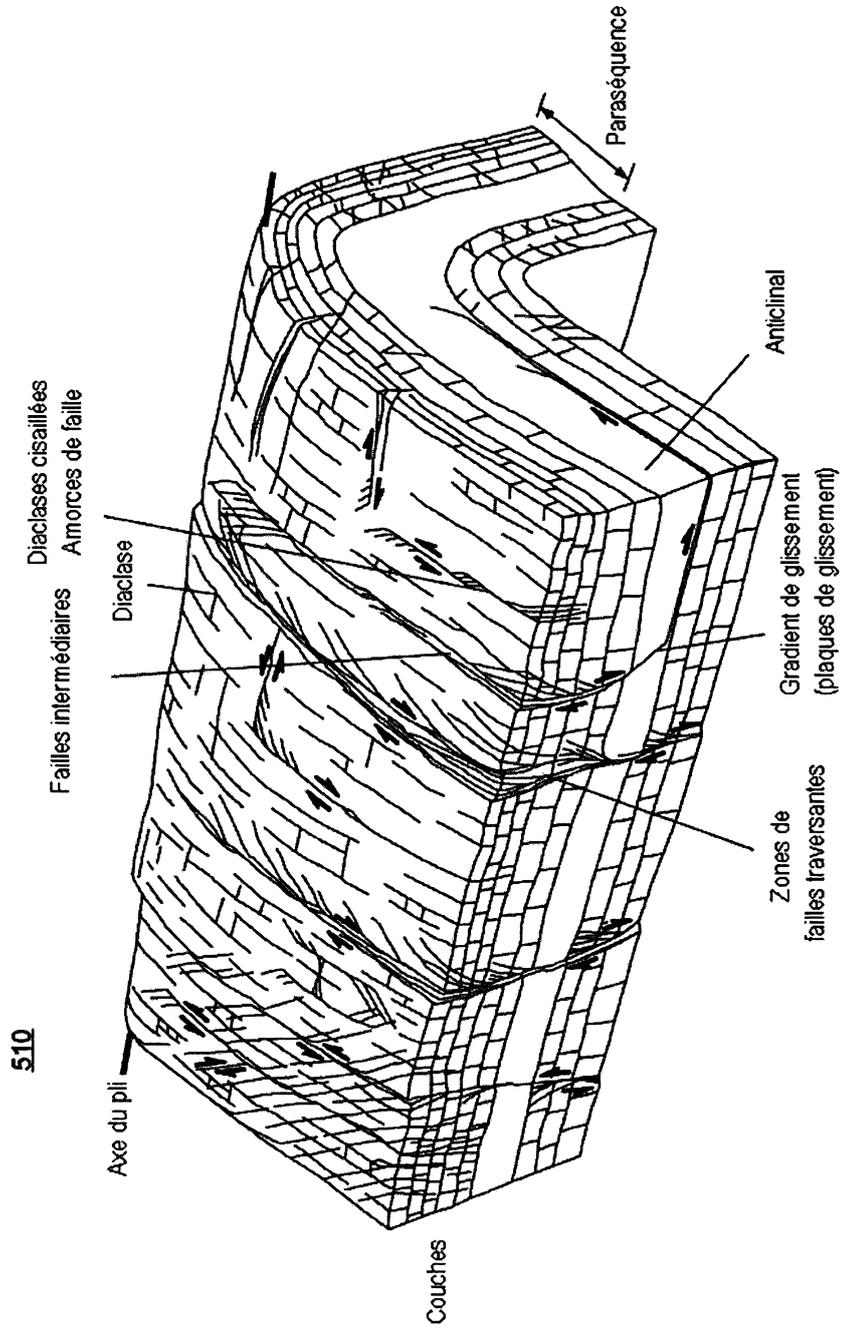


Fig. 5

Représentation graphique 610

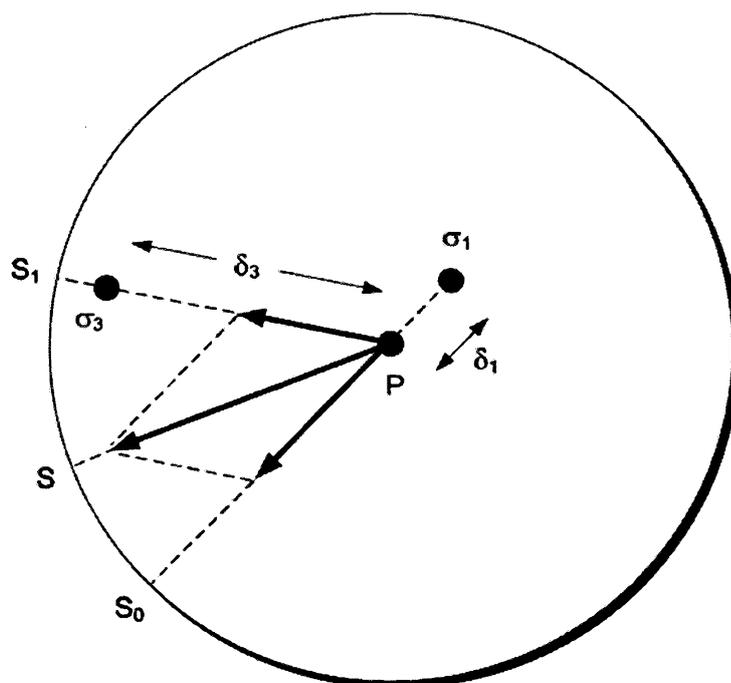


Fig. 6

7 / 16

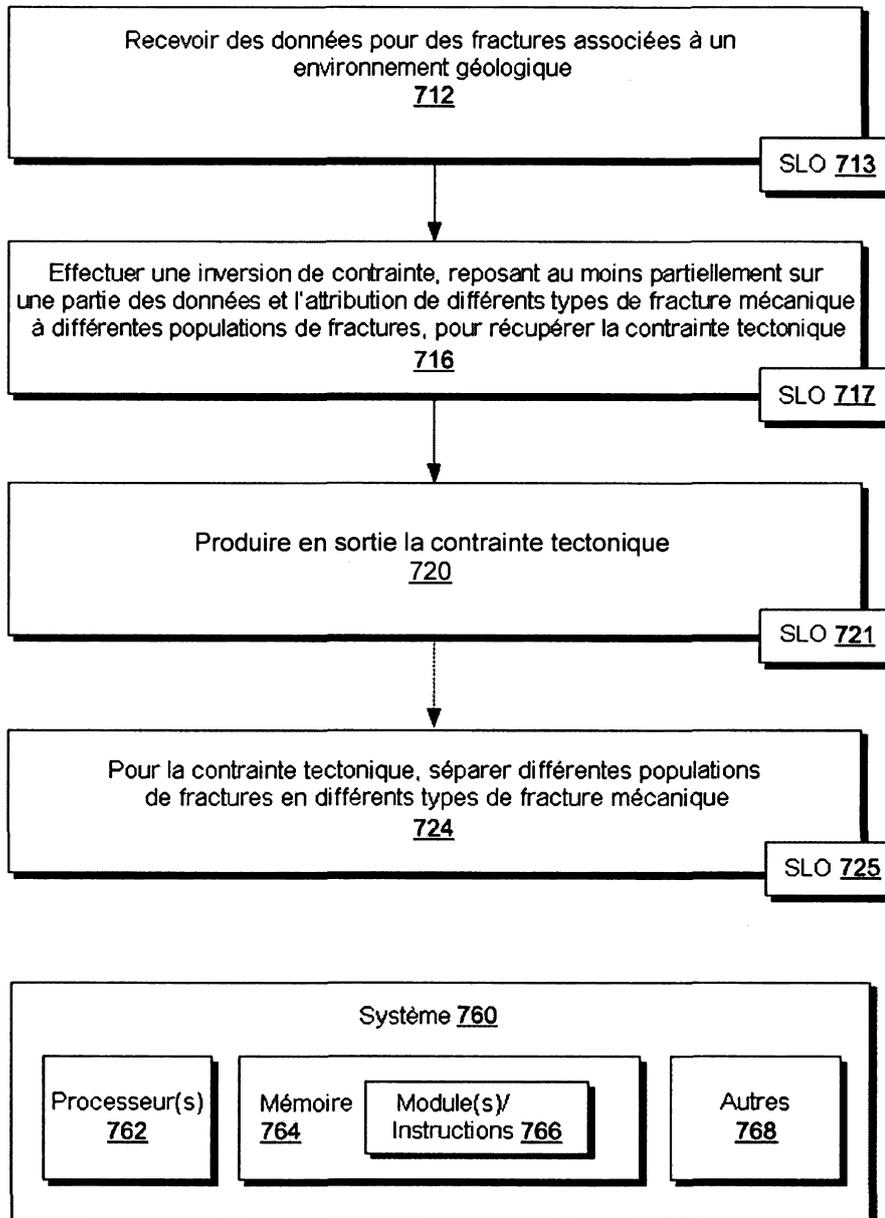
Procédé 710

Fig. 7

8 / 16

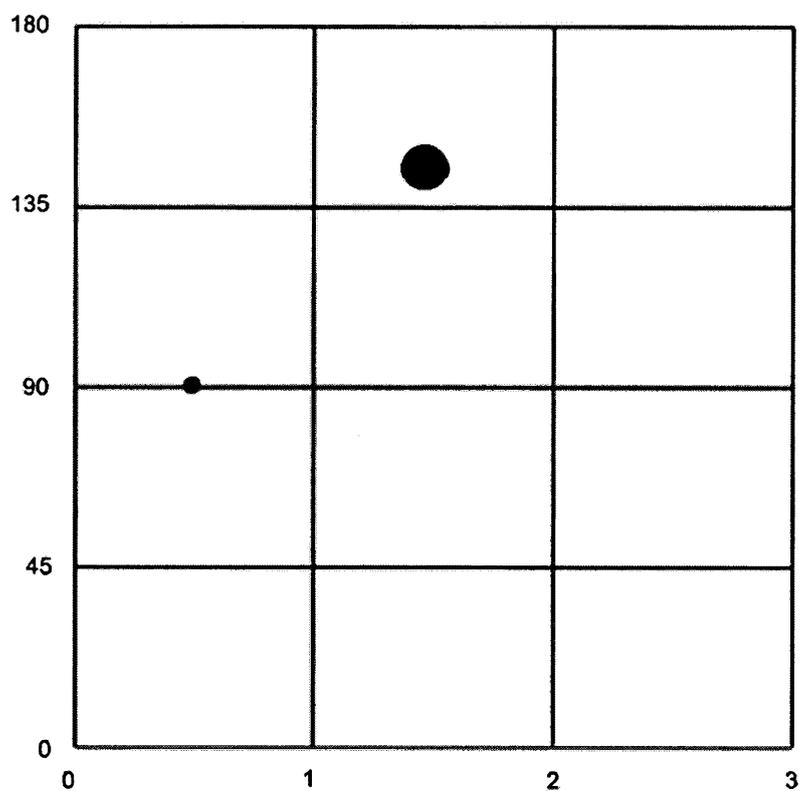
Représentation graphique **810**

Fig. 8

9 / 16

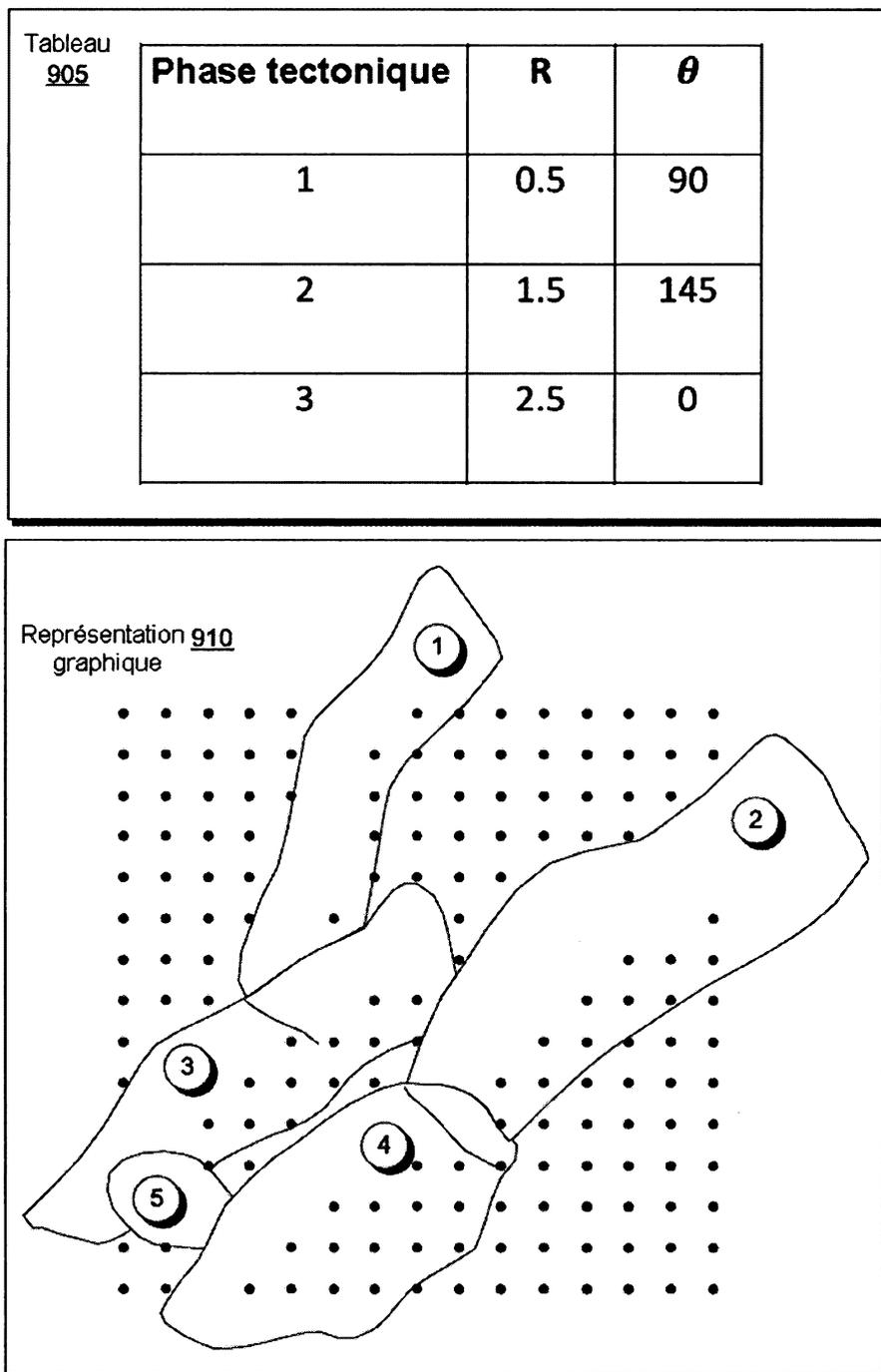
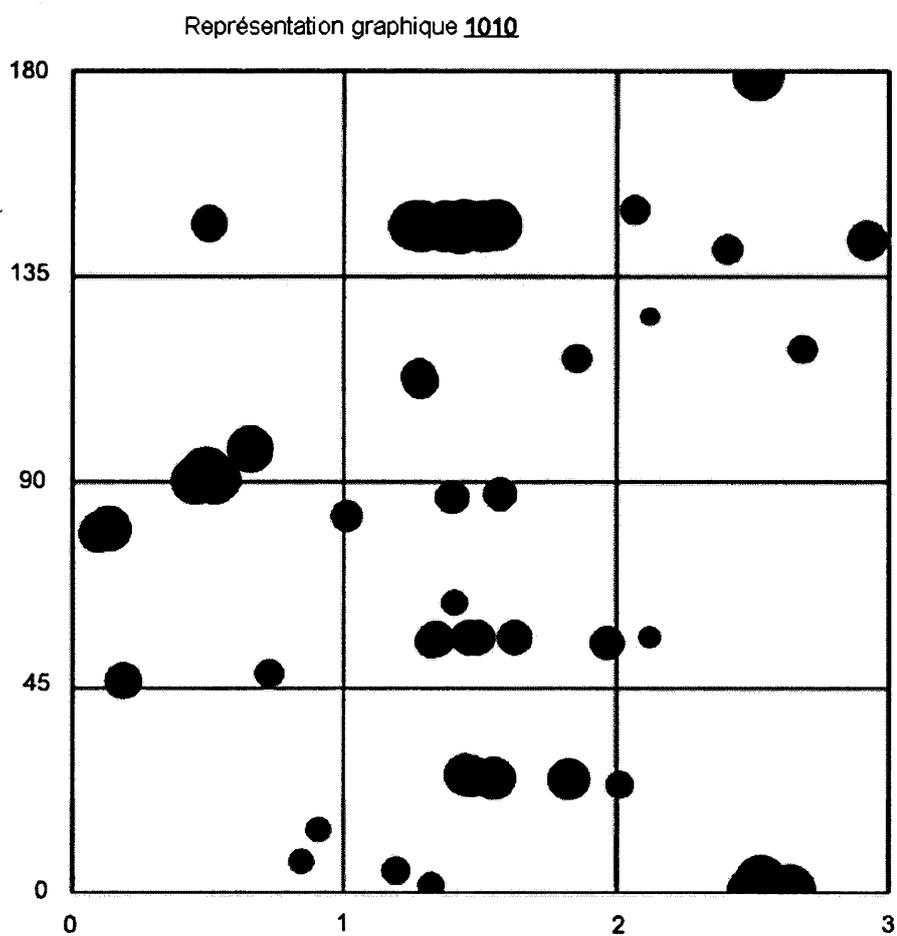


Fig. 9

10 / 16



Représentation 1005
graphique (synthétique)

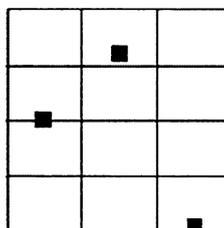


Fig. 10

11 / 16

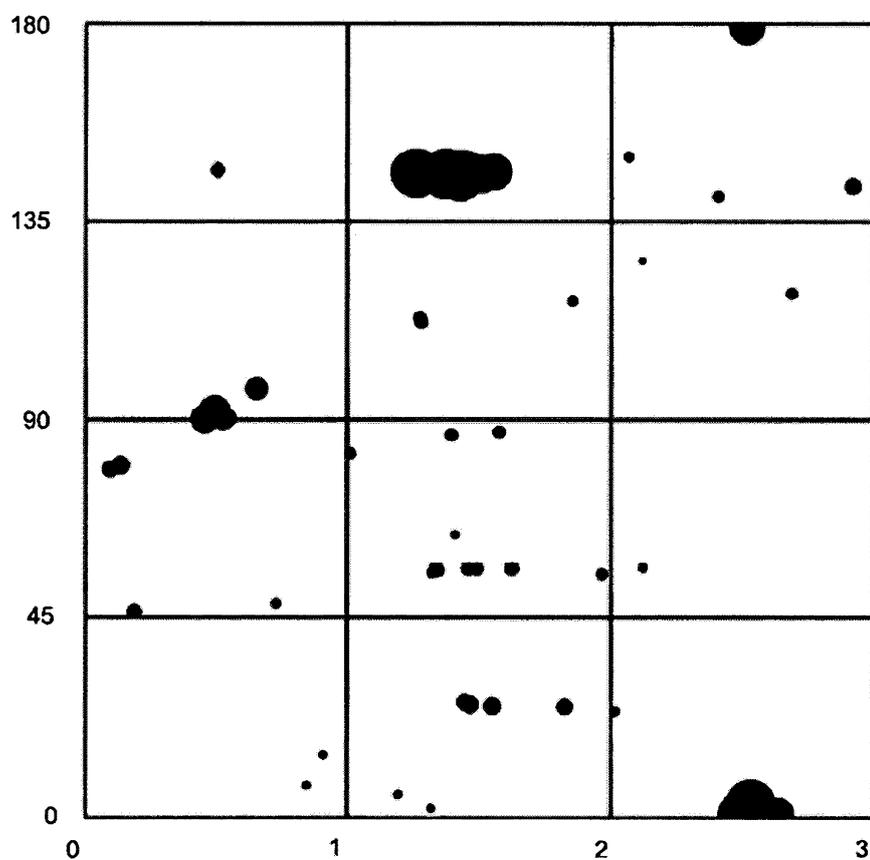
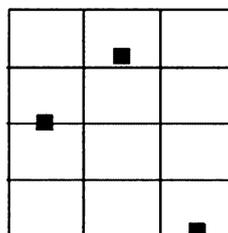
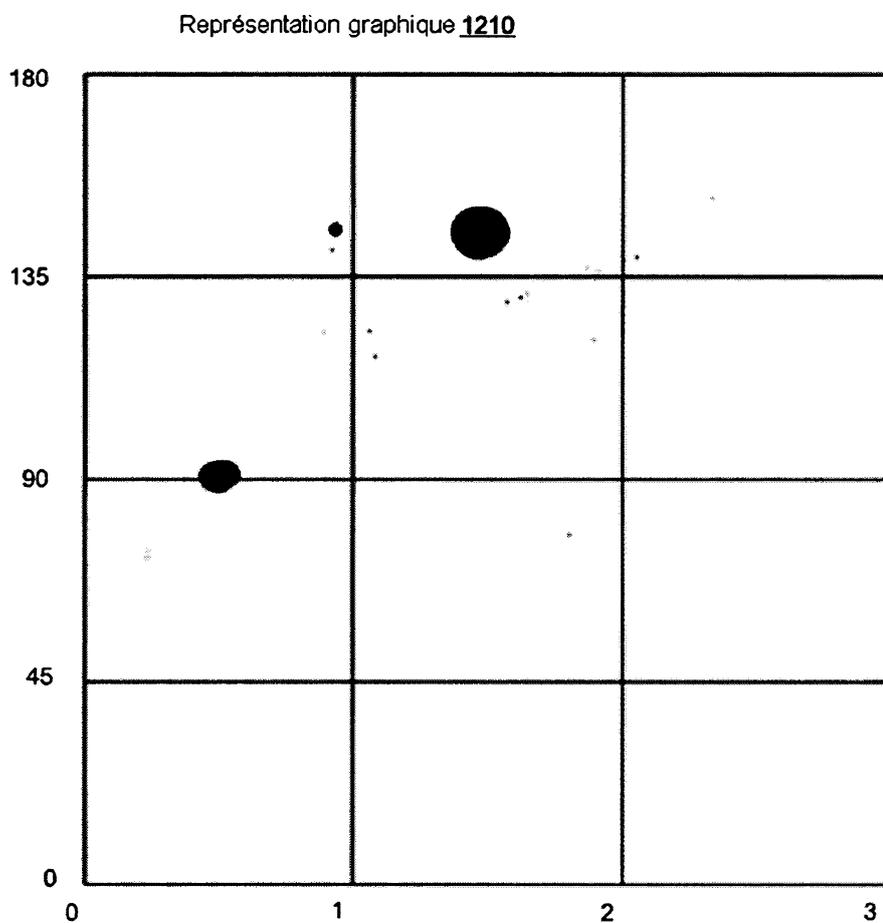
Représentation graphique 1110Représentation 1105
graphique (synthétique)

Fig. 11

12 / 16



Représentation 1205
graphique (synthétique)

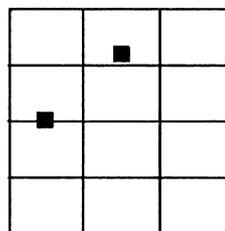
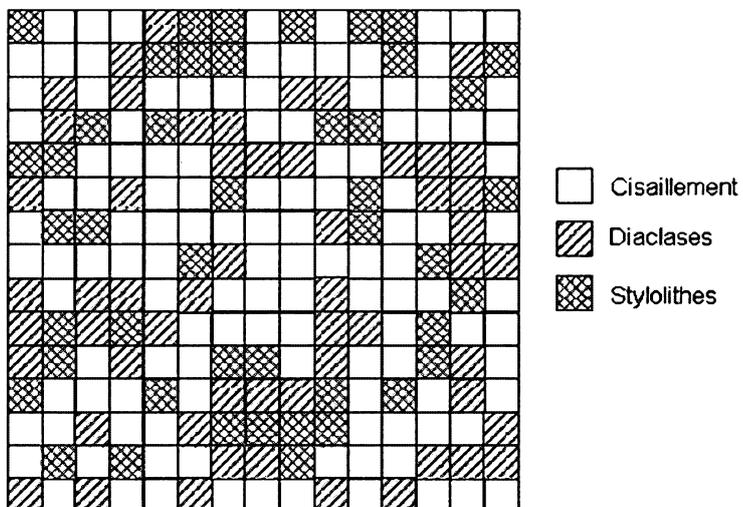
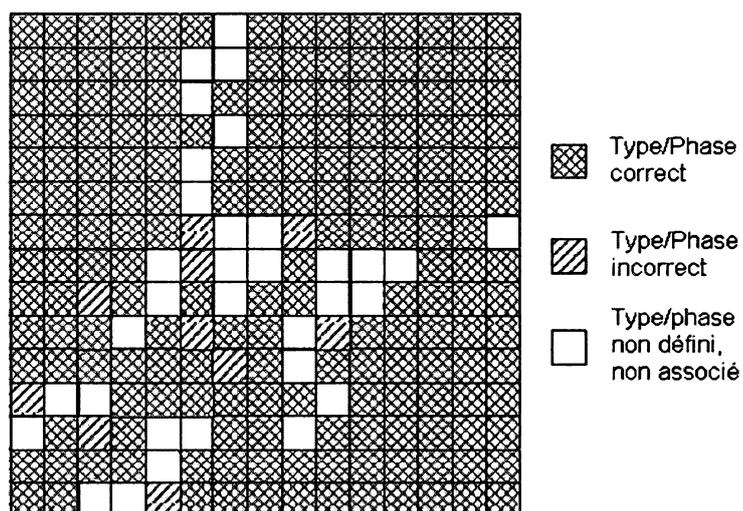
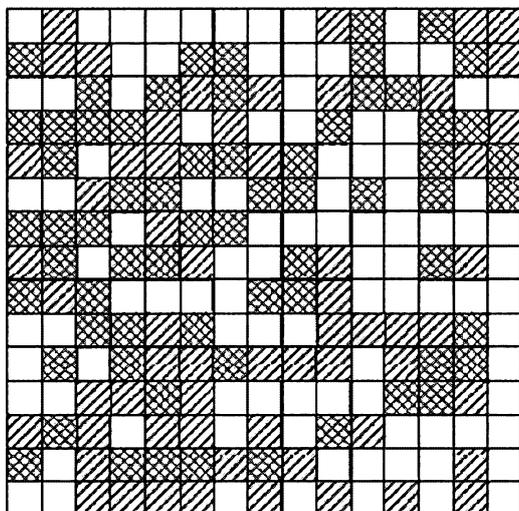


Fig. 12

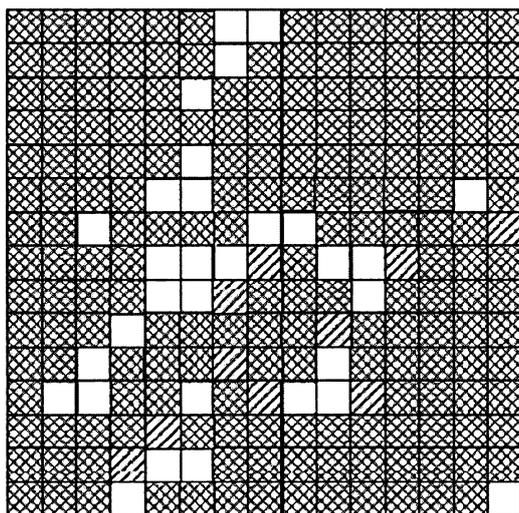
13 / 16

Représentation graphique **1310**Représentation graphique **1330****Fig. 13**

14 / 16

Représentation graphique **1410**

-  Cisaillement
-  Diaclases
-  Stylolithes

Représentation graphique **1430**

-  Type/Phase correct
-  Type/Phase incorrect
-  Type/phase non défini, non associé

Fig. 14

15 / 16

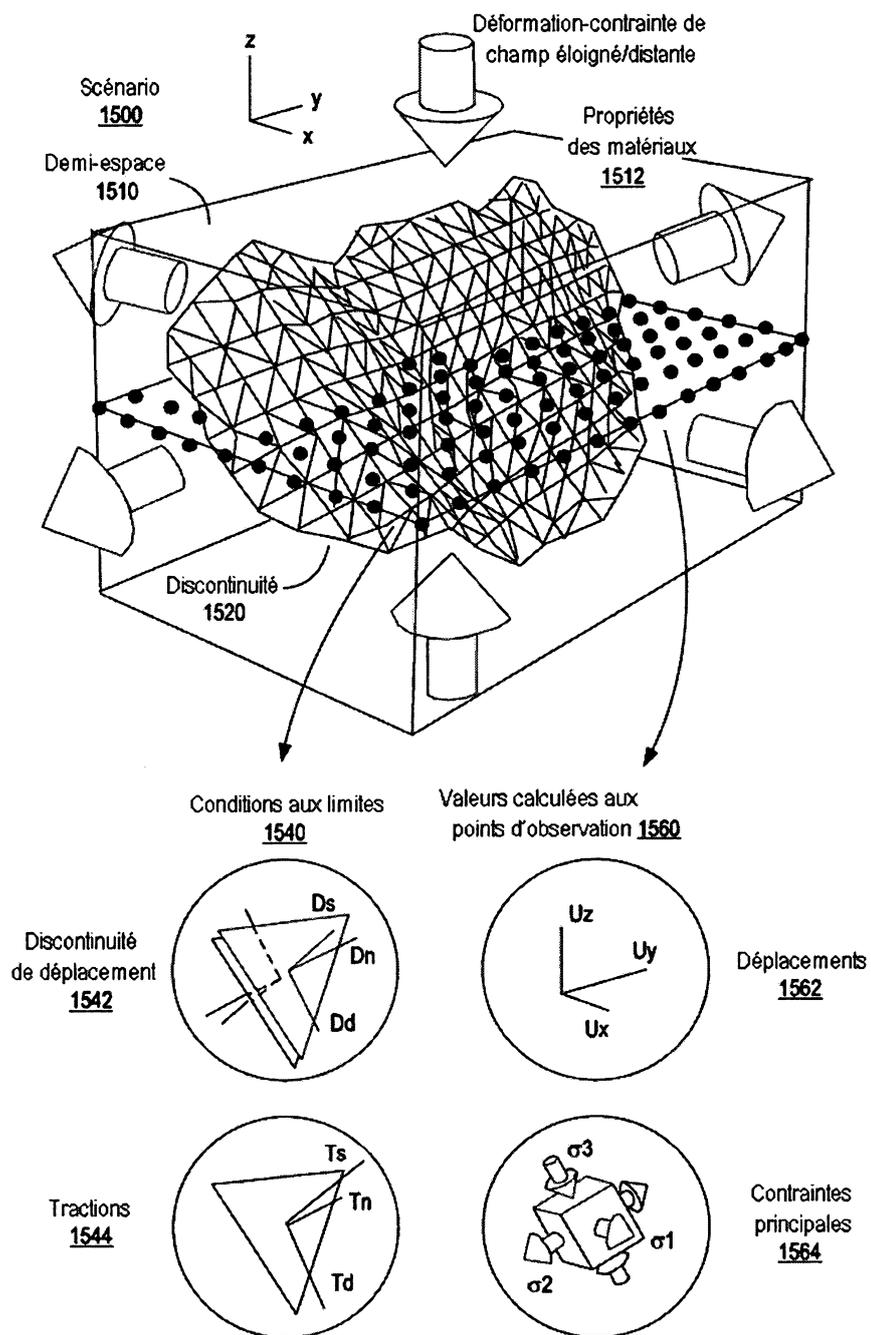


Fig. 15

16 / 16

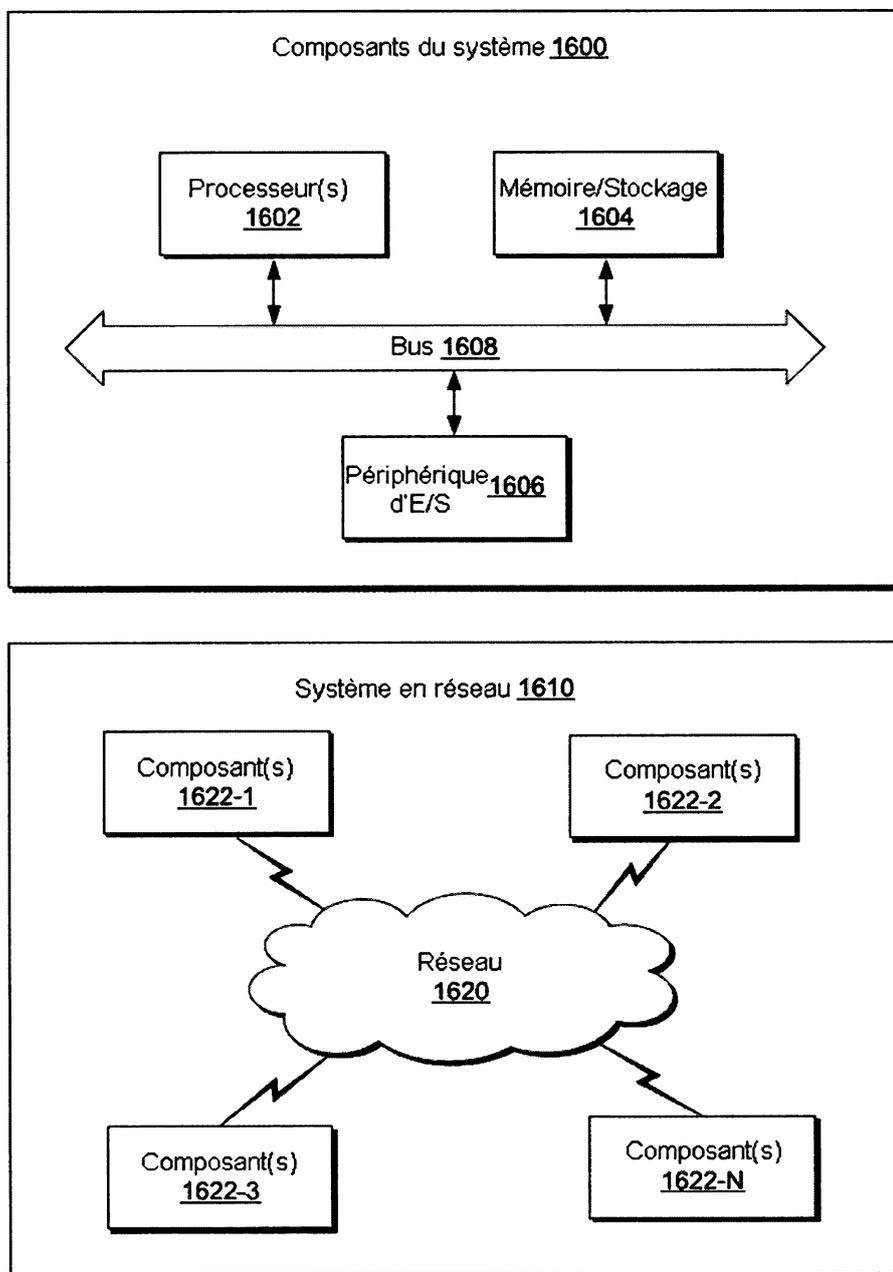


Fig. 16

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-17 et R.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ÉTABLISSEMENT DU PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

- Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.
- Le demandeur a maintenu les revendications.
- Le demandeur a modifié les revendications.
- Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.
- Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.
- Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITÉS DANS LE PRÉSENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

- Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.
- Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.
- Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.
- Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

US 2012/072188 A1 (MAERTEN FRANTZ [FR] ET AL)
22 mars 2012 (2012-03-22)

WO 2014/036045 A1 (SCHLUMBERGER CA LTD [CA]; SCHLUMBERGER SERVICES PETROL [FR]; SCHLUMBER)
6 mars 2014 (2014-03-06)

M.LEFRANC ET AL.: "3D structural restoration and geomechanical forward modeling in a visco-plastic medium to natural fracture prediction in a Malay producing field, offshore Malaysia", OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 25 mars 2014 (2014-03-25), - 28 mars 2014 (2014-03-28), pages 1-7, XP002756005,

US 2012/239298 A1 (MORRIS ALAN P [US] ET AL)
20 septembre 2012 (2012-09-20)

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

NEANT

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT