

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

11 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 139 380

21 N° d'enregistrement national : 23 08350

51 Int Cl⁸ : F 24 T 10/00 (2023.01)

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 01.08.23.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 08.03.24 Bulletin 24/10.

56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Ce dernier n'a pas été établi à la date de publication de la demande.*

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : CGG SERVICES SAS Société par actions simplifiée (SAS) — FR.

72 Inventeur(s) : PETER-BORIE Mariane, CROSSLEY Rob, DRUMM Elisha, POTGIETER Junior, NORMAN Max et WILLIAMS Mark.

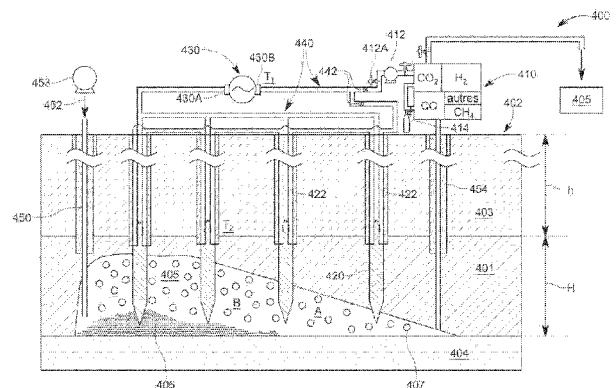
73 Titulaire(s) : CGG SERVICES SAS Société par actions simplifiée (SAS).

74 Mandataire(s) : IPSILON.

54 SYSTÈME ET PROCÉDÉ POUR L'EXTRACTION D'ÉNERGIE ET DE RESSOURCES AVEC DES ÉMISSIONS RÉDUITES.

57 La présente invention concerne un système d'extraction de chaleur (400) destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, le système comportant un outil coaxial (420) configuré pour être placé dans le sous-sol, l'outil coaxial (420) ayant un tuyau externe (520) et un tuyau interne (510) situé à l'intérieur du tuyau externe (520), le tuyau externe (520) et le tuyau interne (510) étant tous deux raccordés à un sabot (530) de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau (512) défini par les tuyaux interne et externe, atteint le sabot (530), et circule à travers un alésage (514) du tuyau interne (510) ; et un générateur électrique (430) raccordé fluidiquement à une unité de traitement chimique (410) pour recevoir un fluide (422), et aussi raccordé fluidiquement avec un premier orifice au tuyau interne (510), et avec un deuxième orifice au tuyau externe (520) de l'outil coaxial (420). Une différence de température du fluide (422) au niveau du générateur électrique (430) et au niveau de l'outil coaxial (420) conduit le générateur électrique (430) à produire de l'énergie.

Figure pour l'abrégié : Fig.4



FR 3 139 380 - A1



Description

Titre de l'invention : SYSTÈME ET PROCÉDÉ POUR L'EXTRACTION D'ÉNERGIE ET DE RESSOURCES AVEC DES ÉMISSIONS RÉDUITES

Domaine technique

[0001] Des modes de réalisation de l'objet décrit dans les présentes concernent de façon générale un système et un procédé destinés à extraire de l'énergie et/ou des ressources précieuses d'un gisement de charbon ou similaire, et plus particulièrement, un processus et un système associés destinés à exploiter un gisement souterrain de charbon sans extraire le charbon et le ramener à la surface pour qu'il soit brûlé dans une centrale électrique, ce qui réduit la pollution.

Exposé du contexte

[0002] L'utilisation de l'hydrogène gazeux et de la chaleur géothermique sont deux composantes importantes de la transition vers une énergie verte. En plus d'être une ressource essentielle utilisée dans l'industrie chimique, l'hydrogène, lorsqu'il est brûlé pour de l'électricité uniquement, génère de l'eau douce comme sous-produit.

L'utilisation de l'énergie géothermique (qu'elle soit générée naturellement par la terre ou induite par l'homme, par exemple par combustion de charbon à son emplacement souterrain) est vaste, depuis la production d'électricité jusqu'à une multitude d'usages localisés et directs, tels que le chauffage d'un quartier, les traitements industriels, le chauffage agricole et aquacole, et la baignade récréative.

[0003] Depuis les années 1960, la consommation mondiale d'énergie a suivi une tendance à la hausse linéaire (environ 2200 TWh de plus chaque année) et le charbon reste l'une des trois principales ressources énergétiques avec le pétrole et le gaz, comme l'illustrent les [Fig.1A] et 1B, qui sont extraites de Ritchie, H., Roser, M. et Rosado, P. (2022), "Energy", publié en ligne à l'adresse [OurWorldInData.org.](https://ourworldindata.org/energy), et récupérées depuis : ourworldindata.org/energy. La consommation de charbon continue de croître avec le temps, et en conséquence, sa part contributive à la consommation mondiale reste stable. Le charbon reste la source dominante de combustible pour la production d'énergie et de substances chimiques dans de nombreuses parties du monde. La décarbonation de l'exploitation du charbon apparaît comme l'un des défis indispensables à relever si le monde doit réduire ses émissions de CO₂ rapidement et à grande échelle.

[0004] La gazéification souterraine du charbon (UCG) est étudiée depuis le début du XXe siècle et plusieurs programmes de production à long terme réussis se sont développés. Elle est considérée comme une option prometteuse pour l'exploitation avancée et propre du charbon. L'UCG est un processus de gazéification in situ de charbon naturel.

Le processus de gazéification comporte la combustion contrôlée de couches ou d'une veine de charbon pour produire un mélange de gaz, appelé gaz de synthèse, comportant du méthane et de l'hydrogène, mais du dioxyde de carbone et du monoxyde de carbone sont également produits. On notera que la couche de charbon n'est pas extraite du sous-sol, mais est brûlée d'une manière contrôlée à son emplacement souterrain.

[0005] Différents procédés de développement pour la gazéification in situ de ressources charbonnières existent déjà. Tous impliquent l'introduction de vapeur d'eau et d'air ou d'oxygène dans une veine de charbon par un puits d'injection, l'inflammation du charbon, et le transport des gaz résultants jusqu'à la surface par un puits de production. Concernant la conception de l'exploitation, il existe divers procédés qui impliquent des puits d'injection et de production reliés par toute une gamme de processus, notamment le puits vertical relié (LVW), le point d'injection à rétraction contrôlée (CRIP), les tubes de production intégrés pour puits unique (SWIFT), et les veines à forte déclivité (SDS). L'adéquation de ces procédés UCG dépend de paramètres tels que la perméabilité naturelle de la veine de charbon, la géochimie du charbon, l'épaisseur, la profondeur et l'inclinaison de la veine.

[0006] Les proportions des différents composants gazeux dans le gaz de synthèse sont principalement fonction de la qualité et du rang du charbon, de la profondeur de la veine, et de l'agent de gazéification (oxygène ou air). Les [Fig.2A] et 2B montrent la composition du gaz de synthèse pour différents projets signalés dans la littérature. La ligne noire fait référence au pouvoir calorifique du gaz, en MJ/m³ (sec, TPN), avec l'échelle sur l'axe de droite du graphique, et le pourcentage volumique de gaz produit sur l'axe de gauche du graphique, qui renvoie aux barres. Les principaux composants du gaz de synthèse sont H₂, CO, CH₄, CO₂ ainsi que N₂, H₂S et COS. En principe, tous ces composants peuvent être utilisés ou réinjectés dans le sol, sans aucune émission de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, tout en fournissant des éléments utiles pour la transition énergétique. Certains de ces composants constituent un combustible pour les centrales nucléaires et une matière première pour l'industrie chimique.

[0007] Par exemple, H₂, qui est principalement utilisé pour produire des substances chimiques, est désormais une source d'énergie prometteuse. Plusieurs essais ont été menés pour améliorer la production d'hydrogène dans l'UCG [1-4]. Selon les propriétés du charbon, la profondeur, les paramètres opérationnels, le cadre hydrogéologique et le processus de combustion, l'hydrogène peut être un produit principal du gaz de synthèse dans l'UCG, et le CO₂ et le CO gazeux peuvent être des composants relativement mineurs, comme l'illustre la FIG. 2. Plusieurs installations pilotes UCG à l'échelle industrielle ont montré une teneur en hydrogène dans le gaz de synthèse atteignant plus de 70 %, et des expériences de laboratoire une teneur allant jusqu'à 84 %. Le méthane (CH₄), qui est un autre composant du gaz de synthèse, peut

être utilisé pour produire des composants chimiques.

- [0008] Les deux dernières décennies de recherche dédiées à l'UCG se sont focalisées sur la réinjection et la séquestration de CO₂ directement dans la cavité formée par UCG [5]. Des simulations numériques effectuées par [5] et concernant la séquestration à long terme de CO₂ à environ 1 km de profondeur dans une cavité multiple post-UCG à l'échelle commerciale ont démontré que l'injection et la séquestration de CO₂ dans des cavités UCG constituent un concept réalisable et viable. D'autres projets se sont intéressés à la CCS couplée, mais pas à l'intérieur de la cavité elle-même.
- [0009] Un autre composant du gaz de synthèse, le CO, peut être utilisé pour la production de substances commerciales supplémentaires telles que le méthanol, ou d'engrais.
- [0010] Comme ces composants du gaz de synthèse peuvent être efficacement utilisés comme combustible ou matières premières pour l'industrie chimique, le processus UCG est séduisant pour la décarbonation de l'industrie charbonnière.
- [0011] Autre facteur important à prendre en compte lors de la mise en œuvre de la décarbonation du processus UCG, les hautes températures associées à ce processus. Les températures de gazéification aérienne du charbon dépassent habituellement les 1000 °C. Les températures de combustion souterraine sont généralement plus froides en raison de l'afflux d'eau souterraine, mais peuvent encore dépasser les 600 °C. La recherche sur la chaleur souterraine générée dans la veine de charbon et les couches environnantes s'est largement concentrée sur les processus thermodynamiques et les impacts sur la qualité et la thermomécanique du gaz de synthèse, plutôt que sur l'utilisation de la chaleur comme source d'énergie. Néanmoins, quelques études ont prédit que la température élevée dans la veine de charbon et dans les couches environnantes y restera longtemps, comme l'illustre schématiquement le graphe de température présenté sur la [Fig.3], qui est extrait de [6].
- [0012] La chaleur produite par la combustion du charbon représente une énorme quantité d'énergie, avec des températures autour de 600 °C dans la cavité. Par exemple, pour un charbon bitumineux moyennement volatil avec un pouvoir calorifique de 32 MJ/kg, avec une épaisseur de veine de 4 m et une superficie de 1 km², on estime que 5,4 mégatonnes de charbon sont disponibles avec une énergie thermique potentielle totale de 174,1 pétajoules (en supposant une veine de charbon continue avec une masse volumique de 1350 kg/m³). Après application d'une réduction de 50 % pour le charbon non brûlé (inaccessible et laissé pour le support du plafond), et une efficacité de capture d'énergie thermique en énergie électrique même de seulement 2%, cela équivaut à environ 48 GWh ou un équivalent de 28 235 barils de pétrole. Cette quantité d'énergie est suffisante pour de grosses applications industrielles.
- [0013] Si l'on considère que cet exemple ne reflète qu'une très petite partie des veines de charbon disponibles qui peuvent être ciblées pour une gazéification souterraine du

charbon propre et verte, il est évident qu'une énorme quantité d'énergie pourrait être exploitée avec des émissions minimales. Plusieurs solutions technologiques ont été proposées pour collecter une partie de la chaleur produite par le processus de combustion. À cet égard, [7] a proposé la circulation d'eau dans un tube de refroidissement dans le puits de production, avec un double usage final : refroidissement du puits de production pour atténuer les dommages dus aux conditions extrêmes, et collecte de la chaleur perdue. Les auteurs dans [8] ont proposé d'utiliser un échange de chaleur dans des tuyaux à double gaine, ou un équipement de coproduction de chaleur et gaz complexe [9, 10] pour extraire la chaleur du puits de production. Les auteurs dans [11] ont proposé de faire circuler un fluide entre les puits d'injection et de production pour collecter directement la chaleur par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur inséré dans le puits de production. Les auteurs dans [12] ont proposé un dispositif spécifique comportant un tuyau de transport de fluide frigorigène devant être inséré dans le puits de production pour collecter la chaleur et refroidir le puits. Les auteurs dans [13] ont proposé un système basé sur des canalisations de conduction thermique insérées dans des forages verticaux et raccordées à un système de production thermoélectrique pour produire de l'électricité à partir de chaleur. Les auteurs dans [14] se sont appuyés sur un système intégré qui est inséré dans des puits horizontaux pour enflammer le charbon, extraire la chaleur et stocker le dioxyde de carbone.

[0014] D'autres ont proposé d'utiliser des galeries et des tunnels dans l'UCG. Par exemple, les auteurs dans [15] ont proposé de creuser des canaux pour des canalisations dans le terrain de couverture, avant une UCG impliquant des galeries. Les auteurs dans [16] ont proposé d'utiliser des solénoïdes dans des parois de tuyaux enroulés en spirale. Les deux procédés sont adaptés à l'exploitation par galeries. D'autres procédés d'exploitation du charbon, tels que le procédé d'extraction par fluidisation in situ du charbon profond, ou la combustion du charbon de surface au moyen d'une réaction, ont été associés à l'extraction de chaleur. Entre autres, certaines recherches antérieures se sont concentrées sur l'extraction de chaleur à partir du gaz de synthèse produit par UCG au moyen d'un système d'échangeur de chaleur à la surface, comme exposé dans [17]. Similairement, l'exploitation de la chaleur perdue dans les cokeries a été étudiée et développée par les auteurs dans [18].

[0015] Des dispositifs pour l'extraction de chaleur dans des zones de combustion de charbon superficielles (naturelles ou artificielles, généralement superficielles) ont été décrits dans [19, 20], et sont basés sur des tuyaux en acier horizontaux situés dans la zone de combustion du gisement de charbon, et ces tuyaux introduisent un fluide caloporteur dans le but d'extraire l'énergie thermique, ou bien ils sont basés sur un gros échangeur de chaleur dans un forage de type tubage vertical (jusqu'à 30 m de diamètre) qui

comporte une enveloppe cylindrique de forte conductivité thermique.

[0016] Une fois installés dans des puits de production, la quantité de chaleur collectée est limitée, et la chaleur restante dans la cavité UCG reste largement inexploitée. De plus, des dispositifs directement insérés dans le charbon rencontreront des conditions extrêmes pouvant compromettre leur durée de vie. D'autres technologies, basées sur l'extraction de chaleur depuis le terrain de couverture au moyen de puits horizontaux [21], peuvent ouvrir une brèche dans le confinement du charbon et représenter un risque de pollution (fuite de gaz).

[0017] Ainsi, les procédés existants sont soit susceptibles d'endommager l'équipement utilisé en raison de la chaleur directe éprouvée par les diverses pièces conçues pour extraire la chaleur, soit dangereux pour l'environnement en raison du risque de pollution. Par conséquent, il existe un besoin pour des solutions complémentaires et adaptables, appropriées même pour les veines de charbon profondes, conçues pour collecter de plus grandes quantités de chaleur et pour limiter le risque d'endommagement des dispositifs d'extraction de chaleur. De plus, ces nouveaux procédés et systèmes doivent infliger une perturbation minimale au terrain de couverture et surveiller l'environnement pour atténuer l'impact environnemental potentiel dû aux fuites de gaz incontrôlées et aux mouvements de terrain.

Résumé de l'invention

[0018] Un mode de réalisation concerne un système d'extraction de chaleur destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, et le système comporte un outil coaxial configuré pour être placé dans le sous-sol, l'outil coaxial ayant un tuyau externe et un tuyau interne situé à l'intérieur du tuyau externe, le tuyau externe et le tuyau interne étant tous deux raccordés à un sabot de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau défini par les tuyaux interne et externe, atteint le sabot, et circule à travers un alésage du tuyau interne. Le système comporte également un générateur électrique raccordé fluidiquement à une unité de traitement chimique pour recevoir un fluide, et aussi raccordé fluidiquement avec un premier orifice au tuyau interne et avec un deuxième orifice au tuyau externe de l'outil coaxial. Une différence de température du fluide au niveau du générateur électrique et au niveau de l'outil coaxial conduit le générateur électrique à produire de l'énergie.

[0019] Selon certains modes de réalisation, le système d'extraction de chaleur comprend :
un outil coaxial configuré pour être placé dans le sous-sol, l'outil coaxial ayant un tuyau externe et un tuyau interne situé à l'intérieur du tuyau externe, le tuyau externe et le tuyau interne étant tous deux raccordés à un sabot de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau défini par les tuyaux interne et externe, atteint le sabot, et circule à travers un alésage du tuyau interne ; et

un générateur électrique raccordé fluidiquement à une unité de traitement chimique pour recevoir un fluide, et aussi raccordé fluidiquement avec un premier orifice au tuyau interne, et avec un deuxième orifice au tuyau externe de l'outil coaxial, dans lequel une différence de température du fluide au niveau du générateur électrique et au niveau de l'outil coaxial conduit le générateur électrique à produire de l'énergie.

[0020] Selon certains modes de réalisation, le système d'extraction de chaleur comprend en outre :

une unité de traitement chimique configurée pour recevoir du gaz de synthèse issu d'une veine de charbon en combustion située dans le sous-sol, et pour extraire du CO₂ et du H₂ du gaz de synthèse ; et

un compresseur raccordé fluidiquement entre l'unité de traitement chimique et le générateur électrique pour fabriquer du CO₂ supercritique à utiliser comme le fluide.

[0021] Selon certains modes de réalisation, seul le sabot est configuré pour être placé dans la veine de charbon.

[0022] Selon certains modes de réalisation, le système d'extraction de chaleur comprend en outre :

un compresseur supplémentaire configuré pour pomper de l'air ou de l'oxygène à l'intérieur de la veine de charbon pour favoriser la combustion du charbon.

[0023] Selon certains modes de réalisation, le sabot est constitué d'un matériau qui supporte des températures supérieures à 500 °C, le tuyau externe est attaché au sabot, le tuyau interne est situé concentriquement à l'intérieur du tuyau externe et forme l'anneau avec le tuyau externe, et l'outil coaxial comporte en outre :

un raccord souple configuré pour raccorder le tuyau externe au sabot de telle sorte que le tuyau externe peut se dilater et se contracter sans fuite du fluide à l'intérieur de l'anneau,

dans lequel le tuyau interne et le tuyau externe sont configurés pour former une boucle ininterrompue pour le fluide entre un sommet de l'anneau et un sommet de l'alésage tout en permettant également au fluide d'entrer en contact direct avec le sabot.

[0024] Selon certains modes de réalisation, l'outil coaxial comprend en outre :

un élément faisant crépine (150) situé entre le tuyau interne et le sabot ; et
un raccord souple supplémentaire entre le tuyau interne et l'élément faisant crépine, dans lequel la boucle s'étend depuis l'anneau jusqu'à l'alésage par une pluralité de trous formés dans l'élément faisant crépine.

[0025] L'invention s'étend aussi à un procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, le procédé comprenant :

la mise en place d'un ou plusieurs outils coaxiaux dans le sous-sol, l'outil coaxial ayant un tuyau externe et un tuyau interne situé à l'intérieur du tuyau externe, le tuyau

externe et le tuyau interne étant tous deux raccordés à un sabot de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau des tuyaux interne et externe, atteint le sabot, et circule également à travers un alésage du tuyau interne, seul le sabot étant en contact avec une veine de charbon située dans le sous-sol ;

le raccordement fluide d'un générateur électrique à une unité de traitement chimique pour recevoir un fluide, et aussi le raccordement fluide d'un premier orifice du générateur électrique au tuyau interne et le raccordement d'un deuxième orifice du générateur électrique au tuyau externe de l'outil coaxial ; et

la production d'énergie avec le générateur électrique, exclusivement sur la base d'une différence de température du fluide au niveau du générateur électrique et au niveau de l'outil coaxial.

[0026] Selon certains modes de réalisation, le procédé comprend en outre :

le raccordement fluide d'un puits de production à une unité de traitement chimique, qui est configurée pour recevoir du gaz de synthèse issu de la combustion de la veine de charbon située dans le sous-sol, et configurée pour extraire du CO₂ du gaz de synthèse ;

la séparation du CO₂ du gaz de synthèse dans l'unité de traitement chimique ; et

la compression du CO₂ pour fabriquer du CO₂ supercritique à utiliser comme le fluide.

[0027] Selon certains modes de réalisation, le procédé comprend en outre :

la circulation du CO₂ supercritique à travers l'anneau et l'alésage de l'outil coaxial pour qu'il atteigne le sabot et extraie de la chaleur de la veine de charbon en combustion ; et

la circulation du CO₂ supercritique chauffé à travers le générateur électrique pour produire de l'énergie électrique.

[0028] Selon certains modes de réalisation, le procédé comprend en outre :

l'injection d'air ou d'oxygène dans la veine de charbon pour soutenir la combustion.

[0029] Selon certains modes de réalisation, le procédé comprend en outre :

l'extraction de H₂ du gaz de synthèse avec l'unité de traitement chimique.

[0030] Selon certains modes de réalisation, le procédé comprend en outre :

l'injection du CO₂ supercritique dans une cavité formée à la place de la veine de charbon brûlé ; et

le scellement de puits reliés à la cavité pour stocker le CO₂ dans le sous-sol.

[0031] L'invention s'étend aussi à un système d'extraction de chaleur destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, le système comprenant :

un outil coaxial configuré pour être placé dans le sous-sol, l'outil coaxial ayant un tuyau externe et un tuyau interne situé à l'intérieur du tuyau externe, et étant configuré de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau des tuyaux interne et externe,

atteint une extrémité fermée du tuyau externe, et circule également à travers un alésage du tuyau interne ; et

un générateur électrique raccordé fluidiquement à une unité de traitement chimique pour recevoir le fluide, et aussi raccordé fluidiquement avec un premier orifice au tuyau interne, et avec un deuxième orifice au tuyau externe de l'outil coaxial, dans lequel une différence de température du fluide au niveau du générateur électrique et au niveau de l'outil coaxial conduit le générateur électrique à produire de l'énergie.

[0032] Selon certains modes de réalisation, le système d'extraction de chaleur destiné à extraire de la chaleur d'un gisement comprend en outre :

une unité de traitement chimique configurée pour recevoir du gaz de synthèse issu d'une veine de charbon en combustion située dans le sous-sol, et pour extraire du CO₂ et du H₂ du gaz de synthèse ; et

un compresseur raccordé fluidiquement entre l'unité de traitement chimique et le générateur électrique pour fabriquer du CO₂ supercritique à utiliser comme le fluide.

[0033] Selon certains modes de réalisation, les tuyaux interne et externe du système d'extraction de chaleur destiné à extraire de la chaleur d'un gisement sont configurés pour être placés à l'écart d'une verticale, sous un fond de la veine de charbon.

[0034] Selon certains modes de réalisation, le système d'extraction de chaleur destiné à extraire de la chaleur d'un gisement comprend en outre :

un compresseur supplémentaire configuré pour pomper de l'air ou de l'oxygène à l'intérieur de la veine de charbon pour favoriser la combustion du charbon.

[0035] Selon certains modes de réalisation, le tuyau interne et le tuyau externe du système d'extraction de chaleur destiné à extraire de la chaleur d'un gisement sont configurés pour former une boucle ininterrompue pour le fluide entre un sommet de l'anneau et un sommet de l'alésage tout en permettant également au fluide d'entrer en contact direct avec l'extrémité fermée du tuyau externe.

[0036] L'invention vise aussi un procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, le procédé comprenant :

la mise en place d'un ou plusieurs outils coaxiaux dans le sous-sol, l'outil coaxial ayant un tuyau externe et un tuyau interne situé à l'intérieur du tuyau externe, et étant configuré de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau des tuyaux interne et externe, atteint une extrémité fermée du tuyau externe, et circule également à travers un alésage du tuyau interne ;

le raccordement fluide d'un générateur électrique à une unité de traitement chimique pour recevoir le fluide, et aussi le raccordement fluide d'un premier orifice du générateur électrique au tuyau interne et le raccordement d'un deuxième orifice du générateur électrique au tuyau externe de l'outil coaxial ; et

la production d'énergie avec le générateur électrique, exclusivement sur la base

d'une différence de température du fluide au niveau du générateur électrique et au niveau de l'outil coaxial.

- [0037] Selon certains modes de réalisation, le procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement comprend en outre :
- [0038] le déploiement de l'outil coaxial dans un plan en dessous d'un fond de la veine de charbon, le plan faisant un angle non nul avec un plan horizontal.
- [0039] Selon certains modes de réalisation, le procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement comprend en outre :
- [0040] le déploiement de l'outil coaxial pour qu'il suive un chemin en forme de serpent dans le plan.
- [0041] Un autre mode de réalisation concerne un procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, et le procédé comporte la mise en place d'un ou plusieurs outils coaxiaux dans le sous-sol, l'outil coaxial ayant un tuyau externe et un tuyau interne situé à l'intérieur du tuyau externe, le tuyau externe et le tuyau interne étant tous deux raccordés à un sabot de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau des tuyaux interne et externe, atteint le sabot, et circule également à travers un alésage du tuyau interne, seul le sabot étant en contact avec une veine de charbon située dans le sous-sol, le raccordement fluide d'un générateur électrique à une unité de traitement chimique pour recevoir un fluide, et aussi le raccordement fluide d'un premier orifice du générateur électrique au tuyau interne et le raccordement d'un deuxième orifice du générateur électrique au tuyau externe de l'outil coaxial, et la production d'énergie avec le générateur électrique exclusivement sur la base d'une différence de température du fluide au niveau du générateur électrique et au niveau de l'outil coaxial.
- [0042] Encore un autre mode de réalisation concerne un système d'extraction de chaleur destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, et le système comporte un outil coaxial configuré pour être placé dans le sous-sol, l'outil coaxial ayant un tuyau externe et un tuyau interne situé à l'intérieur du tuyau externe et étant configuré de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau des tuyaux interne et externe, atteint une extrémité fermée du tuyau externe, et circule également à travers un alésage du tuyau interne, et un générateur électrique raccordé fluidiquement à une unité de traitement chimique pour recevoir le fluide, et aussi raccordé fluidiquement avec un premier orifice au tuyau interne et avec un deuxième orifice au tuyau externe de l'outil coaxial. Une différence de température du fluide au niveau du générateur électrique et au niveau de l'outil coaxial conduit le générateur électrique à produire de l'énergie.
- [0043] Encore un autre mode de réalisation concerne un procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, et le procédé comporte la mise en place d'un ou plusieurs outils coaxiaux dans le sous-sol, l'outil coaxial ayant un tuyau externe et un tuyau interne situé à l'intérieur du tuyau externe, et étant configuré de telle sorte qu'un fluide circule

à travers un anneau des tuyaux interne et externe, atteint une extrémité fermée du tuyau externe, et circule également à travers un alésage du tuyau interne, le raccordement fluïdique d'un générateur électrique à une unité de traitement chimique pour recevoir le fluïde, et aussi le raccordement fluïdique d'un premier orifice du générateur électrique au tuyau interne et le raccordement d'un deuxième orifice du générateur électrique au tuyau externe de l'outil coaxial, et la production d'énergie avec le générateur électrique exclusivement sur la base d'une différence de température du fluïde au niveau du générateur électrique et au niveau de l'outil coaxial.

Brève description des dessins

- [0044] Pour une compréhension plus complète de la présente invention, il va maintenant être fait référence à la description suivante considérée conjointement avec les dessins annexés, dans lesquels :
- [0045] [Fig.1A] et [Fig.1B] les [Fig.1A] et 1B montrent la consommation mondiale d'énergie et la proportion des sources d'énergie dans l'énergie totale consommée ;
- [0046] [Fig.2A] et [Fig.2B] les [Fig.2A] et 2B illustrent la composition du gaz de synthèse pour différents charbons dans des conditions d'injection d'air ou d'oxygène pour l'UCG ;
- [0047] [Fig.3] la [Fig.3] illustre un modèle de température pour une veine de charbon et d'autres couches dans un gisement à différents moments d'une simulation ;
- [0048] [Fig.4] la [Fig.4] illustre schématiquement un système destiné à extraire de la chaleur et des ressources d'une veine de charbon en combustion ;
- [0049] [Fig.5] la [Fig.5] est un diagramme schématique d'un outil d'extraction de chaleur ayant un sabot destiné à protéger thermiquement des tuyaux interne et externe ;
- [0050] [Fig.6A] la [Fig.6A] est un diagramme schématique du sabot de l'outil d'extraction de chaleur ayant un élément de déformation et la [Fig.6B] est un diagramme schématique du sabot sans l'élément de déformation ;
- [0051] [Fig.7] la [Fig.7] est un diagramme schématique d'un autre outil d'extraction de chaleur ayant un sabot destiné à protéger thermiquement des tuyaux interne et externe ;
- [0052] [Fig.8] la [Fig.8] est un diagramme schématique d'encore un autre outil d'extraction de chaleur ayant un sabot destiné à protéger thermiquement des tuyaux interne et externe ;
- [0053] [Fig.9] la [Fig.9] est un diagramme schématique d'encore un autre outil d'extraction de chaleur ayant un sabot destiné à protéger thermiquement des tuyaux interne et externe ;
- [0054] [Fig.10A] à [Fig.10C] les [Fig.10A] à 10C illustrent diverses formes du sabot ;
- [0055] [Fig.11A] la [Fig.11A] illustre le forage d'un puits pour l'outil d'extraction de chaleur, la [Fig.11B] illustre la mise en place de l'outil d'extraction de chaleur à

l'intérieur du puits de telle sorte que seul le sabot pénètre dans la veine de charbon en combustion, et la [Fig.11C] illustre la fermeture du puits après que la chaleur a été extraite et l'outil d'extraction de chaleur a été retiré ;

[0056] [Fig.12] la [Fig.12] est un schéma fonctionnel d'un procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement souterrain au moyen d'un outil ayant un sabot tel qu'illustré sur la [Fig.5] ;

[0057] [Fig.13] la [Fig.13] illustre un système destiné à extraire de la chaleur d'une veine souterraine de charbon en combustion avec un outil qui n'a pas de sabot ;

[0058] [Fig.14] la [Fig.14] illustre un autre système destiné à extraire de la chaleur d'une veine souterraine de charbon en combustion avec un outil qui n'a pas de sabot ;

[0059] [Fig.15] la [Fig.15] est un schéma fonctionnel d'un procédé destiné à déterminer une configuration devant être utilisée pour extraire de la chaleur d'un gisement souterrain ;

[0060] [Fig.16] la [Fig.16] est un schéma fonctionnel d'un procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement souterrain de charbon en combustion au moyen d'un outil ayant un sabot tel qu'illustré sur les [Fig.5] à 9 ; et

[0061] [Fig.17] la [Fig.17] est un schéma fonctionnel d'un procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement souterrain incliné de charbon en combustion au moyen d'un outil situé sous le gisement.

Description détaillée de l'invention

[0062] La description suivante des modes de réalisation renvoie aux dessins annexés. Les mêmes numéros de référence dans des dessins différents identifient des éléments identiques ou similaires. La description détaillée suivante ne limite pas l'invention. La portée de l'invention est plutôt définie par les revendications annexées. Les modes de réalisation suivants sont présentés, pour des raisons de simplicité, sous l'angle d'un système de collecte de chaleur qui comporte un outil coaxial doté d'un sabot d'extrémité destiné à pénétrer dans un gisement à haute température pour collecter de l'énergie. Le système peut également être configuré pour extraire et/ou générer une ou plusieurs matières premières pour des usines chimiques. Cependant, les modes de réalisation qui seront décrits par la suite ne sont pas limités à l'outil coaxial avec le sabot d'extrémité, mais peuvent être appliqués à d'autres outils destinés à extraire la chaleur, par exemple un outil sans sabot d'extrémité.

[0063] Dans toute la description, quand il est fait référence à « un mode de réalisation », cela signifie qu'un attribut, une structure ou une caractéristique particuliers présentés dans le cadre d'un mode de réalisation est inclus dans au moins un mode de réalisation de l'objet décrit. Ainsi, l'apparition de la phrase « dans un mode de réalisation » à divers endroits dans l'ensemble de la description ne fait pas nécessairement référence au même mode de réalisation. En outre, les attributs, structures ou caractéristiques par-

ticulaires peuvent être combinés de n'importe quelle manière appropriée dans un ou plusieurs modes de réalisation.

- [0064] Selon un mode de réalisation, un nouveau système pour l'extraction de chaleur et de matières premières à partir d'un processus d'oxydation de charbon souterrain est introduit, et ce système est configuré pour réduire la quantité de pollution associée à l'exploitation traditionnelle du charbon. Le système est configuré pour capturer la chaleur générée pendant le processus UCG à l'aide d'un ou plusieurs outils coaxiaux, chacun ayant un sabot d'extrémité, aussi pour capturer le gaz de synthèse généré par le processus UCG et pour en séparer diverses matières premières pour un usage industriel, et pour intégrer la réinjection, le recyclage et la séquestration souterraine des gaz à effet de serre (GES) présents dans le gaz de synthèse non utilisés à des fins industrielles.
- [0065] Dans une application, le système utilise des solutions complémentaires et adaptables pour produire de l'électricité à partir de la chaleur extraite du sous-sol au moyen des outils coaxiaux (par exemple, des sabots en acier de puits coaxiaux dans la cavité, des puits coaxiaux déviés dans les couches sous-jacentes ou des puits en forme de serpentín dans les couches sous-jacentes). Les produits finaux de ce système sont, dans un mode de réalisation, l'électricité issue de la chaleur souterraine, et l'hydrogène issu du gaz de synthèse. Selon les besoins commerciaux, d'autres matières premières pour l'industrie chimique, telles que le méthanol, peuvent également être extraites. Les autres constituants du gaz de synthèse seront réinjectés dans le sol. Aucun GES n'est libéré dans l'atmosphère.
- [0066] Le système peut être mis en œuvre dans différentes configurations. Une modélisation technico-économique basée sur des simulations thermohydrauliques permet de définir les meilleures conceptions pour le système dans un contexte géologique donné. Les conceptions peuvent être « ajustées » à la technologie utilisée pour l'UCG : procédés avec ou sans galeries, point d'injection à rétraction contrôlée, puits verticaux reliés, tubes de production intégrés pour puits unique, et procédés associés à des veines à forte déclivité.
- [0067] Le système peut comporter plusieurs outils coaxiaux qui sont déployés dans des puits forés dans le gisement. Dans une application, certains ou tous les outils coaxiaux sont entraînés dans le sol sans avoir à forer des puits. Différents schémas peuvent être utilisés pour la pluralité de puits/outils pour extraire la chaleur, autrement dit le nombre et la distribution géographique des outils au-dessus du gisement peuvent être calculés sur la base des paramètres du gisement. Chaque outil coaxial dans le puits utilise une circulation en boucle fermée d'un fluide de travail (où il n'y a aucun contact entre (1) la masse rocheuse et ses composants et le charbon et (2) le fluide de travail circulant dans les puits). La chaleur est extraite du milieu par conduction thermique par le biais

du chemisage/tuyau externe du puits de forage ou le long des sabots en acier inoxydable en bas de l'outil. Une convection peut apparaître dans les zones à forte perméabilité (cavités, couches perméables et fractures) ; cela améliore le taux de transfert de la chaleur extractible, et offre de meilleures performances au système.

[0068] Toute une gamme de fluides de travail peuvent être utilisés dans les boucles fermées des outils coaxiaux. Cependant, dans une application, du CO₂ supercritique (S-CO₂) est utilisé comme fluide de travail, car il présente plusieurs avantages. Le CO₂ est l'un des composants du gaz de synthèse et apparaît comme une solution bon marché et locale. La supercriticité du CO₂ peut être atteinte au-dessus de sa température critique (31 °C) et de sa pression critique (7,4 MPa). De plus, le S-CO₂ est chimiquement stable et ininflammable. Le S-CO₂ est un candidat prometteur pour le cycle de tête des centrales à haute température afin d'améliorer le rendement thermique. En effet, le S-CO₂ à haute température (> 500 °C) présente d'excellentes performances (> 50 % de rendement thermique), en particulier lorsqu'il est utilisé dans les cycles de Brayton, mais aussi dans les cycles de Rankine, les turbines à gaz à cycle combiné (CCGT), et les cycles directs et indirects à CO₂ supercritique.

[0069] Différents scénarios d'extraction de chaleur et/ou de matières premières à partir d'un gisement souterrain de charbon vont maintenant être présentés par renvoi aux figures. La [Fig.4] illustre un tel scénario dans lequel un système 400 comporte une unité de traitement chimique 410, un ou plusieurs outils coaxiaux 420, et un générateur électrique 430. L'unité de traitement chimique 410 est facultative, car le système 400 peut extraire de la chaleur sans une telle unité. Le générateur électrique 430 est raccordé fluidiquement, par un système de tuyaux 440, à la fois à l'usine de traitement chimique 410 et aux outils coaxiaux 420. Le générateur électrique peut comporter une turbine, qui est actionnée par la circulation de S-CO₂, et un alternateur, qui est configuré pour transformer en électricité la rotation mécanique de la turbine. D'autres dispositifs peuvent être utilisés pour collecter la chaleur et/ou l'énergie cinétique de la circulation de S-CO₂, par exemple un échangeur de chaleur à la place ou en plus du générateur électrique 430. Dans une application, le générateur électrique 430 est raccordé fluidiquement avec un premier orifice à un tuyau interne de l'outil coaxial 420, et avec un deuxième orifice à un anneau formé par le tuyau interne et un tuyau externe de l'outil coaxial 420. L'unité de traitement chimique 410 peut comporter l'un quelconque des éléments connus d'une usine chimique destinés à séparer le gaz de synthèse en ses principaux composants. Les composants de l'outil coaxial 420 seront présentés plus loin.

[0070] La [Fig.4] montre un gisement ou une couche de charbon 401 ayant une épaisseur H, qui est enterré à une certaine distance h sous la surface 402. La figure montre un terrain de couverture 403 et une couche sous-jacente 404, respectivement au-dessus et

en dessous de la veine de charbon 401. La figure montre également qu'une partie de la veine de charbon 401 a déjà été brûlée et qu'il en reste une cavité 405. La cavité comporte un peu de cendres 406 et du gaz de synthèse 407. Un puits d'injection d'oxydant 450 est foré à l'intérieur de la veine de charbon 401, sur un côté, pour introduire de l'air ou de l'oxygène 452 destiné à brûler le charbon. Un compresseur 453 peut être utilisé pour pomper l'air ou l'oxygène 452 à l'intérieur du puits 450. Un puits d'extraction de produit 454 est également foré à l'intérieur de la veine de charbon 401, sur un autre côté, à l'écart du puits d'injection d'oxydant 450, pour extraire le gaz de synthèse 407. Le puits d'extraction de produit 454 est raccordé fluidiquement à l'unité de traitement chimique 410.

[0071] L'unité de traitement chimique 410 sépare le gaz de synthèse 407 en ses différents composants, par exemple CO_2 , H_2 , CO , CH_4 , etc. Comme indiqué précédemment, le CO_2 peut être utilisé comme le fluide 422 qui circule à l'intérieur de l'outil coaxial 420. Le fluide 422 peut être du CO_2 , qui est d'abord transformé en CO_2 supercritique, par exemple à l'aide d'un compresseur 412, puis injecté à l'intérieur de la tuyauterie 440. Des clapets antiretour 442 peuvent être présents dans la tuyauterie 440 pour garantir que le S- CO_2 circule le long d'un chemin souhaité, c.-à-d. depuis le générateur électrique 430 jusqu'au tuyau interne des outils coaxiaux 420, et de nouveau jusqu'au générateur électrique par l'anneau formé par les tuyaux interne et externe des outils 420. Le sens de cette circulation peut être inversé, c.-à-d. qu'il entre d'abord dans l'anneau, le parcourt entièrement jusqu'à l'intérieur de la veine de charbon, et remonte ensuite par l'alésage du tuyau interne. De cette façon, la circulation de S- CO_2 alimente en continu le générateur électrique tant que de la chaleur est extraite de la veine de charbon 401. Après que le compresseur 412 a lancé la circulation de S- CO_2 , la circulation est auto-entretenu, même si le compresseur est arrêté (la vanne 412A est fermée), car la différence de température $T_2 - T_1$ maintient la circulation, où T_1 est la température de la circulation de S- CO_2 au niveau du générateur électrique 430 et T_2 est la température de la circulation de S- CO_2 en bas de l'outil coaxial 420. On notera que la différence de température $T_2 - T_1$ peut être d'environ 500 °C ou plus.

[0072] Le CO produit dans l'unité de traitement chimique 410 peut être traité avec de l'oxygène provenant d'une source d'oxygène 414 pour augmenter la quantité de CO_2 disponible, de sorte qu'une quantité suffisante de CO_2 est pompée à travers la tuyauterie 440 pour remplir le ou les outils coaxiaux 420. À la fin du processus, c.-à-d. quand la veine de charbon 401 a été entièrement brûlée, le CO_2 utilisé peut être injecté à l'intérieur de la cavité 405 de telle sorte qu'il n'y a pas du tout de CO_2 libéré dans l'atmosphère. On notera que la [Fig.4] montre que lorsque la combustion du charbon progresse, différentes zones de température apparaissent dans la cavité 405, par exemple une zone de séchage et de pyrolyse A, où la température est d'environ 200 à

550 °C, une zone réductrice B, où la température est d'environ 550-900 °C, et une zone oxydante C, où la température est supérieure à 900 °C.

[0073] Dans une application, les outils coaxiaux 420 sont installés avant la combustion du charbon et restent en place pendant la combustion. Le sabot de l'outil est inséré dans la veine de charbon non brûlé comme le montre la [Fig.4]. Selon la résistance mécanique du charbon, la profondeur et les difficultés techniques, un trou préalable peut être foré ou, si le charbon est suffisamment mou, le sabot peut y être entraîné. Le carottage de la veine de charbon avant la gazéification constitue une opportunité de mieux comprendre les caractéristiques du charbon, notamment la composition, la porosité, les propriétés thermiques, et d'autres paramètres pertinents. La connaissance accrue des propriétés du charbon offrira des renseignements précieux sur le comportement du charbon pendant le processus de gazéification.

[0074] Dans une application, le puits de forage est entièrement tubé et isolé de la masse rocheuse de couverture. La cimentation n'est pas essentielle, et en fonction des caractéristiques opérationnelles spécifiques du site, le système pourrait être retiré après le processus, s'il est placé dans un tubage externe correct (dans ce cas, le sabot du tubage externe doit se situer au-dessus de la veine de charbon, comme exposé plus loin). Le sabot est en contact direct avec le charbon devant être brûlé. Cela rend le système plus résistant à un endommagement potentiel dû aux températures ultra-hautes et aux processus de corrosion apparaissant pendant la combustion. Le sabot est conçu pour résister aux déformations thermomécaniques dues aux contraintes thermiques, aux mouvements du sol pendant le processus de liaison, et en cas d'effritement de la voûte. Le sabot est constitué d'alliages qui peuvent résister à une température élevée (jusqu'à 1000 °C), des environnements corrosifs, une contrainte thermique, une explosion, et avec une conductivité thermique suffisante aux températures rencontrées. À très haute température, la stabilité thermique est le premier facteur pris en compte, car elle peut imposer des limites à un type particulier d'alliage du point de vue du ramollissement ou, plus généralement, de la fragilisation, et peut induire un changement dans les propriétés thermiques (la conductivité thermique en particulier). On notera que le sabot peut absorber de grosses déformations, car il ne s'agit pas d'un élément de support, mais seulement de l'outil de transfert de chaleur. Par conséquent, la résistance à la rupture au fluage à haute température constitue la base de la sélection de l'alliage.

[0075] L'outil coaxial 420 va maintenant être présenté par renvoi à la [Fig.5]. Cet outil coaxial 420 (également appelé dans les présentes « outil de puits » ou « outil » ou « outil d'extraction de chaleur ») comporte un tuyau interne 510, un tuyau externe 520 concentrique du tuyau interne 510, et un sabot d'extrémité 530. Le tuyau externe 520 est raccordé au sabot 530 par un premier raccord souple 540, tandis que le tuyau interne 510 est raccordé au sabot 530 par un deuxième raccord souple 541. Un raccord

souple 540/541 est tout raccord entre deux éléments différents qui permet à un des éléments ou aux deux de se dilater pour des raisons thermiques tout en conservant l'intégrité de la circulation de fluide à travers le raccord, c.-à-d. ne laissant pas fuir le fluide. Un exemple d'un tel raccord souple a été introduit dans la demande de brevet international indiquée dans [22], qui est intégré aux présentes par renvoi. Le raccord souple 540/541 permet aux deux éléments raccordés (par exemple, 510 et 530, ou 520 et 530) de réaliser un raccordement fluide qui peut se dilater quand la température augmente, sans gauchissement ni fuite de fluide à l'extérieur.

[0076] On notera que pour réaliser le raccordement avec le tuyau externe 520, dans un mode de réalisation, le sabot 530 a des filets 610 sur une surface externe 532, à côté de la surface supérieure 536, comme le montrent les [Fig.6A] et 6B. Pour réaliser le raccordement avec le tuyau interne 510, dans le mode de réalisation de la [Fig.6A], le sabot 530 comporte également un élément faisant crépine 550, qui est fabriqué d'une seule pièce avec le corps 531 du sabot. L'élément faisant crépine 550 est façonné comme un manchon avec un alésage interne, et les parois latérales du manchon ont une pluralité de trous 552. Pour réaliser le raccordement avec le tuyau interne dans le mode de réalisation de la [Fig.6B], le sabot 530 présente un épaulement 534, qui fait saillie depuis la surface supérieure 536 du sabot, et des filets 610 sont formés sur la surface latérale 534A de l'épaulement 534, en plus des filets 610 formés sur le côté 532 du corps 531. L'homme du métier comprendra que cette mise en œuvre est l'une des multiples mises en œuvre possibles pour le raccord souple 540.

[0077] Retournons à la [Fig.5], où le tuyau interne 510 peut être raccordé avec encore un autre raccord souple 541 à l'élément faisant crépine 550, lorsqu'il est présent. Comme exposé plus loin, il existe des modes de réalisation où l'élément faisant crépine 550 est omis. L'élément faisant crépine 550 peut être un tuyau ayant le même diamètre interne et/ou externe que le tuyau interne 510, ainsi qu'une pluralité de trous 552 pour permettre à un fluide 554 de quitter un anneau 512 formé par la surface externe du tuyau interne 510 et la surface interne du tuyau externe 520, et pénétrer dans l'alésage 514 du tuyau interne 510. De cette façon, le fluide 554 peut être pompé depuis la surface à l'intérieur de l'anneau 512, mis en contact direct avec le sabot 530, puis retourné à la surface par l'alésage 514, tout en transportant la chaleur transférée depuis le sabot. Ainsi, une boucle ou un chemin 556 est formé depuis le sommet de l'anneau 512 jusqu'au sabot 530 et ensuite jusqu'au sommet de l'alésage 514. Dans certaines circonstances, le sens de circulation le long de la boucle ou du chemin peut être l'inverse de celui indiqué sur la [Fig.5]. On notera qu'un sommet 558 de l'outil 420 correspond à la partie de l'outil qui est configurée pour être attachée à un élément de tubage avant d'être abaissée à l'intérieur du puits ou entraînée à l'intérieur du sol. Cela signifie que la partie supérieure 558 de l'outil 420 peut avoir des filets 559 pour être

attachée à l'élément de tubage. Ainsi, le tuyau interne 510 et le tuyau externe 520 sont configurés pour former une boucle ininterrompue 556 pour le fluide 554 entre un sommet de l'anneau 512 et un sommet de l'alésage 514 tout en permettant également au fluide 554 d'entrer en contact direct avec le sabot 530.

- [0078] Dans le mode de réalisation montré sur la [Fig.5], le sabot est fabriqué pour être plein, autrement dit son corps 531 n'a ni trous, ni canaux, à l'exception de l'élément faisant crépine 550, qui a les trous 552. Le corps et la crépine peuvent être constitués d'une seule pièce de matière. Le sabot est constitué d'un métal ou d'un alliage qui peut supporter les températures élevées (par ex., entre 500 et 1200 °C) et/ou les hautes pressions, par exemple jusqu'à 20 MPa. Dans une application, le sabot est constitué de tungstène ou de titane. Dans une autre application, pour laquelle il est important que le prix du sabot soit aussi bas que possible, un alliage avec de grandes qualités peut être utilisé. Par exemple, les aciers inoxydables sont les premiers auxquels on pense, car ils offrent un bon équilibre entre le prix et la résistance aux environnements extrêmes, en particulier les alliages généralement employés pour les réacteurs thermiques et pour les chambres de combustion, qui ont une plus grande résistance à la traction à haute température. Les alliages comportant du chrome, de l'aluminium et du titane offrent une bonne résistance aux conditions extrêmes (déformation et mécanisme de corrosion à haute température). On notera que lorsque la qualité de l'alliage augmente, son coût augmente.
- [0079] Dans un autre mode de réalisation, tel qu'illustré sur la [Fig.7], l'élément faisant crépine 550 peut être omis (autrement dit, la configuration du sabot 530 représentée sur la [Fig.6B] est utilisée) et les trous 552 peuvent être directement ménagés dans la partie inférieure du tuyau interne 510. Dans ce cas, le raccord souple 541 entre le tuyau interne et l'élément faisant crépine n'est pas présent, car le tuyau interne se couple directement au sabot 530, avec le raccord souple 541 montré sur la figure.
- [0080] Dans encore un autre mode de réalisation, tel qu'illustré sur la [Fig.8], le tuyau interne 510 est solidement attaché au tuyau externe 520 par un ou plusieurs ergots 810. Dans ce cas, l'extrémité inférieure 510A du tuyau interne 510 est située au-dessus du sabot 530, de sorte qu'un chemin libre 556 se libère pour le fluide 554 depuis l'anneau 512 jusqu'à l'alésage 514. En d'autres termes, il n'y a pas d'élément faisant crépine 550 ni de trous 552 associés au sabot 530 dans ce mode de réalisation. Les ergots 810 peuvent aussi être utilisés dans les modes de réalisation précédents, c.-à-d. pour fixer le tuyau interne par rapport au tuyau externe. Cependant, dans les modes de réalisation précédents, il est également possible que le tuyau interne soit indépendant du tuyau externe, autrement dit qu'ils ne se touchent pas par l'intermédiaire d'un quelconque composant, excepté l'élément faisant crépine et/ou le sabot.
- [0081] Dans encore un autre mode de réalisation, tel qu'illustré sur la [Fig.9], le tuyau

interne 510 se raccorde directement au sabot 530, par exemple par l'intermédiaire du raccord souple 541, et aucun trou 552 n'est présent dans le tuyau interne. Pour ce mode de réalisation, la configuration du sabot 530 présentée sur la [Fig.6B] est utilisée. Ainsi, pour ce mode de réalisation, il n'y a pas de circulation directe de fluide depuis l'anneau 512 jusqu'à l'alésage 514. Dans ce cas, une pluralité de canaux 910 sont formés à travers le corps du sabot 530, lesquels raccordent fluidiquement l'anneau 512 à l'alésage 514, de sorte que le flux de fluide 556 passe toujours de l'anneau à l'alésage, mais par l'intermédiaire du corps du sabot. Dans cette situation, le fluide devrait retirer plus de chaleur du corps du sabot, car le fluide pénètre effectivement à l'intérieur du sabot. Bien que tous les modes de réalisation précédents montrent un raccordement souple 540/541 entre les tuyaux interne et externe et le sabot d'extrémité, l'homme du métier comprendra que des raccordements non souples peuvent aussi être utilisés, même s'il y a des fuites de fluide. On notera que pour tous les modes de réalisation précédents, le sabot comporte uniquement un corps plein sans aucun autre composant, c.-à-d. aucun trou, canal, vanne, etc. Seul le mode de réalisation de la [Fig.9] présente une structure supplémentaire, à savoir les canaux 910.

[0082] En ce qui concerne la forme du sabot 530, les modes de réalisation précédents l'ont illustré sous la forme d'une balle, par exemple avec le plus grand diamètre extérieur correspondant au diamètre extérieur du tuyau externe, puis le corps ayant un sommet 538, comme le montre la [Fig.5]. La longueur du corps (c.-à-d. depuis l'épaule 534 jusqu'au sommet 538) peut être sélectionnée en fonction de la largeur du gisement à explorer. Dans une application, pour le mode de réalisation présenté sur la [Fig.5], la longueur de l'élément faisant crépine 550 est sélectionnée pour dépendre du diamètre du puits dans lequel l'outil 420 est placé.

[0083] Dans une application, comme le montre la [Fig.10A], le corps 531 du sabot 530 présente une hélice 533 s'étendant sur une longueur du sabot. L'hélice peut être ajoutée ou formée à l'intérieur du corps 531 pour favoriser l'avance du sabot à l'intérieur du sous-sol quand un puits n'est pas préalablement foré pour abaisser l'outil 420. On notera que l'outil 420 peut être abaissé à l'intérieur d'un puits préalablement foré ou peut être entraîné dans le sol, si le sous-sol est mou. La [Fig.10B] montre un autre mode de réalisation dans lequel la forme du sabot 530 est un cône plat. La [Fig.10C] montre encore un autre mode de réalisation dans lequel la forme du sabot 530 est cylindrique 1010, avec des extrémités de forme pointue 1012, par exemple un cône. L'homme du métier comprendra que d'autres formes peuvent être utilisées.

[0084] Quand on souhaite utiliser l'outil 420 (comme l'illustrent les [Fig.11A] à 11C), diverses données (par ex., étude sismique, ou informations acquises pendant le forage du puits, etc.) sont collectées à l'étape 1200 (voir le schéma fonctionnel de la [Fig.12]) avant l'abaissement (ou l'entraînement) de l'outil dans le sol. On notera que les

[Fig.11A] à 12 présentent la façon d'utiliser un outil individuel 420, mais les mêmes procédures peuvent être employées pour les autres outils 420 montrés sur la [Fig.4]. Sur la base de ces informations collectées, un contour supérieur de la veine de charbon 401 est déterminé. À l'étape 1202, un puits 1102 est foré pour atteindre le sommet de la veine de charbon comme le montre la [Fig.11A], puis, à l'étape 1204, l'outil 420 est abaissé (ou entraîné si aucun puits n'est préalablement foré) dans le puits 1102 jusqu'à ce que le sabot 530 soit en contact direct avec la veine de charbon. Dans ce mode de réalisation, seul le sabot est en contact direct avec la veine de charbon, pas les tuyaux interne et externe, comme l'illustre la [Fig.11B]. Cela rend le système plus résistant à un endommagement potentiel dû aux températures ultra-hautes et aux processus de corrosion apparaissant dans les fluides à haute température. Le sabot 530 est conçu pour résister aux déformations thermomécaniques dues aux contraintes thermiques, et aux mouvements du sol pendant le processus d'extraction de chaleur. Comme exposé précédemment, le sabot peut être constitué d'alliages qui résistent à une température élevée (jusqu'à 1000 °C), des environnements corrosifs, une contrainte thermique, une explosion, et avec une conductivité thermique suffisante aux températures rencontrées. À très haute température, la stabilité thermique est le premier facteur pris en compte, car elle peut imposer des limites à un type particulier d'alliage du point de vue du ramollissement ou de la fragilisation, et des changements dans les propriétés thermiques telles que la conductivité thermique avec une variation de température. On notera que le sabot peut absorber de grosses déformations, car il ne s'agit pas d'un élément de support pour l'outil 420, mais seulement d'un élément de transfert de chaleur. En d'autres termes, l'outil 420 est supporté à l'intérieur du puits 1102 par un tubage correspondant 1110, qui peut comporter une pluralité d'éléments de tubage raccordés les uns aux autres, comme l'illustre la [Fig.11B]. Un élément de tubage peut avoir une longueur d'environ 12 m. L'outil 420 peut avoir une longueur similaire ou inférieure. La pluralité d'éléments de tubage peuvent être raccordés les uns aux autres par des filets, comme on le sait dans le métier. L'outil 420 peut être raccordé par des filets à l'extrémité inférieure du dernier élément de tubage.

[0085] La forte conductivité thermique des alliages à haute température permet le transfert de chaleur du sabot métallique 530 aux tuyaux coaxiaux 510/520. Des simulations numériques thermohydrauliques sont lancées pour optimiser la conception de l'outil et du puits correspondant (longueur et diamètre du sabot, diamètre du puits, nombre et position des systèmes de puits coaxiaux avec sabot).

[0086] La [Fig.11A] montre un tubage de surface 1104 et un tubage sacrificiel 1106 installés dans le puits 1102, qui est foré avec un train de tiges de forage 1108. On notera que les deux tubages sont installés au-dessus de la veine de charbon. Le train de tiges de forage 1108 peut avoir une pointe de forage 1109 pour forer le puits 1102. Une table

tournante 1112 installée à la surface du puits est utilisée pour entraîner la pointe de forage. Quand le puits est prêt, la pointe de forage 1109 et le train de tiges de forage 1108 sont retirés et l'outil 420 est abaissé dans le puits, comme le montre la [Fig.11B]. Pour aligner l'outil 420 avec l'axe longitudinal du puits 1102, un centreur 1114 peut être installé sur l'outil 420, comme le montre la figure. Dans un mode de réalisation, pour empêcher le fluide provenant de la veine de charbon de pénétrer dans le tubage 1106, une garniture d'étanchéité 1116 peut être installée, par exemple juste au-dessus du sabot 530, comme le montre la [Fig.11B]. Pour des raisons de sécurité, pour empêcher la libération violente du fluide depuis le puits 1102 ou le tubage 1110 à la surface, un obturateur de puits 1118 peut être installé sur la tête du puits. Un obturateur de puits 1118 est essentiellement une vanne puissante qui est configurée pour fermer (sceller) le puits si la pression à l'intérieur du puits devient supérieure à une pression donnée. Dans une application, l'anneau entre le tubage sacrificiel 1106 et l'outil coaxial 420 est rempli par un gel visqueux adapté qui garantit l'isolation thermique de l'outil d'extraction de chaleur, tout en limitant les contraintes thermiques sur le tubage sacrificiel et son ciment.

[0087] Après que la chaleur issue de la veine de charbon a été extraite à l'étape 1206, ce qui peut prendre des mois si ce n'est des années, juste avant de retirer le tubage 1110 et l'outil associé 420 du puits à l'étape 1208, il est possible de stocker du CO₂ dans la cavité 405, puis le puits 1102 est scellé avec des bouchons de ciment 1120 à l'étape 1210, comme l'illustre la [Fig.11C]. De cette façon, il y a peu de risque qu'un fluide quel qu'il soit provenant du puits puisse s'échapper à la surface une fois le puits abandonné. Un abandon se produirait si, après un certain laps de temps fonction de l'origine de la chaleur ultra-haute, la chaleur au niveau du sabot n'était plus suffisante pour être extraite de façon économique, et l'outil coaxial avec le sabot pourrait être retiré si une telle conception avait été choisie. Une conception avec abandon prendrait en compte la durée effective prédite de la source de chaleur, qui pourrait être la combustion de charbon ou de tourbe, une gazéification souterraine de charbon, ou un mince dyke ou filon magmatique.

[0088] Une mise en œuvre intelligente et sûre de cette technologie peut être assortie de procédés de surveillance, par exemple se concentrant particulièrement sur la température, la pression, et le comportement mécanique de l'outil et de la masse rocheuse hôte. Une surveillance spécifique supplémentaire peut s'avérer nécessaire en fonction de la nature de la veine de charbon ou de l'UCG. Par exemple, des systèmes de détection acoustique distribuée (DAS) 1103, cimentés derrière le tubage sacrificiel 1106, permettraient la surveillance de la température et de la pression à l'interface entre la masse rocheuse et l'outil, tandis que des fibres de DAS insérées dans l'outil coaxial 420 et fixées au tube interne ou externe donneraient l'évolution de la tem-

pérature et de la pression avec la profondeur dans la boucle coaxiale. Dans une application, un réseau de capteurs sismiques 1130, à la surface (ou enterré dans des environnements bruyants), comme l'illustre schématiquement la [Fig.11A], offre un système supplémentaire pour détecter et localiser la création ou le cisaillement potentiels de failles et de fractures dues à des contraintes thermiques induites. Ce réseau peut également être utilisé pour déterminer l'emplacement de la veine de charbon et pour garantir que seul le sabot 530 pénètre dans la veine de charbon, pas les tuyaux interne et externe.

[0089] En utilisant la nouvelle combinaison de technologies décrite dans les présentes, il est possible de collecter d'importantes quantités d'hydrogène à partir du gaz de synthèse 407, et la chaleur générée par oxydation souterraine de charbon, sans libérer d'émissions nocives dans l'atmosphère. Cela ouvre la porte à une utilisation plus verte des abondantes ressources mondiales de charbon. Les technologies décrites dans les présentes peuvent être configurées pour optimiser la capture de la chaleur générée, puis reçue dans la roche ou dans les fluides, pendant l'oxydation de charbon dans le sous-sol, par exemple par détermination du nombre de puits 1102 nécessaires pour une veine de charbon donnée 401, et aussi de la distribution des puits, et implicitement des outils 420, au-dessus de la veine de charbon 401. La quantité de chaleur capturée permet de délivrer toute l'électricité nécessaire pour répondre aux besoins opérationnels sur site, y compris le forage, le pompage, les mesures, la surveillance et la validation, plus le traitement de l'hydrogène. Cela signifie que ces technologies peuvent être appliquées de façon autonome, et qu'il n'y a pas d'usage parasite d'hydrogène pour des besoins énergétiques sur site. L'électricité en excès peut être utilisée localement pour l'activité industrielle ou fournie au réseau.

[0090] La livraison d'hydrogène peut être optimisée pour les conditions du marché local, par exemple il peut être livré par pipeline, comprimé et refroidi pour être exporté sous forme liquide, transformé en ammoniac pour être exporté comme combustible ou engrais. Un ou plusieurs avantages d'un ou plusieurs modes de réalisation décrits dans les présentes pour les industries qui brûlent actuellement du charbon sont que ces installations existantes n'ont pas besoin d'être fermées, puisque les avancées technologiques rapides montrent que les centrales à charbon peuvent être converties pour brûler de l'hydrogène, tandis que la fabrication de ciment et la production d'acier peuvent utiliser de l'hydrogène et une électricité verte.

[0091] Alors que les modes de réalisation des [Fig.4] et 11A à 11C illustrent le processus d'extraction de la chaleur directement à partir de la veine de charbon 401, dans un autre mode de réalisation, qui est illustré sur la [Fig.13], il est possible d'extraire la chaleur à partir des couches sous-jacentes à la veine de charbon. Plus spécifiquement, la [Fig.13] montre un puits 1302 qui est foré sous la veine de charbon 401, à un angle

α non nul par rapport à un plan horizontal XY lorsque la veine de charbon est inclinée. Cependant, ce procédé peut aussi être utilisé quand la veine de charbon n'est pas inclinée. Dans ce cas, la chaleur est extraite à partir de couches de matière situées sous la veine chaude de charbon en combustion, et ainsi, l'outil 420 est modifié (représenté comme l'outil 1320) pour ne pas avoir le sabot 530. De plus, l'outil 1320 a l'extrémité distale 520A du tuyau externe 520 fermée, de sorte qu'aucun fluide provenant de l'intérieur du tuyau externe ou interne ne communique avec le puits 1302. Seuls le tuyau interne 510 et le tuyau externe 520 sont présents dans le puits 1302, et le fluide 422 est mis en circulation depuis l'alésage du tuyau interne jusqu'à l'anneau des deux tuyaux, ou vice versa. Le fluide atteint le fond du puits 1302, et pendant qu'il circule à travers les tuyaux, il absorbe la chaleur des tuyaux. La veine de charbon 401 est brûlée à l'aide de l'oxydant 452 injecté au niveau du puits d'injection d'oxydant 450 et le gaz de synthèse 407 est extrait au niveau du puits d'extraction de produit 454 et traité dans l'unité de traitement chimique 410.

[0092] Dans une application, le puits 1302 est foré avant la gazéification. La partie supérieure du puits 1302 peut être isolée de la roche de couverture au moyen d'un coulis isolé thermiquement 1304. Le fond du puits 1302, sous la future cavité 405, peut être cimenté au moyen d'un coulis thermiquement amélioré 1306. Le fluide de travail 422, qui peut être, comme exposé précédemment, du CO₂ supercritique provenant du gaz de synthèse 407 est injecté par le tuyau interne 510 et pompé à l'extérieur par l'anneau formé entre le tuyau interne 510 et le tuyau externe 520. La trajectoire de la partie inférieure du puits (qui collectera la chaleur) dépend du procédé UCG. Quand la gazéification implique des procédés basés sur des puits verticaux 450 et 454, des outils coaxiaux déviés 1320 sont utilisés pour l'extraction de chaleur, comme l'illustre schématiquement la [Fig.13]. On notera que bien que cette figure montre un seul puits dévié et un seul outil 1320, une pluralité de puits déviés et une pluralité d'outils 1320 peuvent être utilisés. La trajectoire de l'outil 1320 est parallèle à la direction d'inclinaison de la veine de charbon 401, sous la future cavité 405 créée par le processus UCG.

[0093] Si la gazéification est réalisée au moyen du procédé CRIP, une autre conception peut être employée pour collecter la chaleur à partir d'un puits 1402. Dans ce cas, un système 1400 est basé sur une trajectoire sinueuse forée dans les couches sous-jacentes 404, dans un plan 1410 parallèle à la paroi inférieure 1412 de la veine de charbon 401, comme le montre la [Fig.14]. La [Fig.14] montre que la veine de charbon 401 est inclinée par rapport au plan horizontal XY, avec un angle α non nul, et qu'une cavité 405 est formée à l'intérieur de la veine de charbon en raison de la combustion du charbon. Le puits d'injection d'oxydant 450 et le puits d'extraction de produit 454 dévient par rapport à la verticale, comme le montre la figure. Dans une application,

tous les puits 400, 454 et 1402 sont formés dans le plan 1410, qui s'étend de façon sensiblement parallèle au plan 1414, qui définit la paroi inférieure 1412 de la cavité 405. On notera que les deux plans 1410 et 1414 sont décalés angulairement du plan horizontal XY par l'angle α . Cependant, dans un autre mode de réalisation, il est possible que le plan 1410 soit décalé d'un angle α et que le plan 1414 soit décalé d'un angle α' qui est différent de l'angle α . Dans une application, les parties horizontales des puits 450, 454 et 1402 ne sont pas situées dans le même plan, mais dans au moins deux plans différents.

[0094] Les puits 450 et 454 sont représentés sur la [Fig.14] suivant une trajectoire incurvée, c.-à-d. partant verticalement puis tournant lentement à l'horizontale, mais tous deux suivent une ligne droite le long de la partie verticale et le long de la partie horizontale. Cependant, le puits 1402 est différent, car il forme un serpentín dans le plan 1410, autrement dit il ne suit pas une ligne droite. La forme du puits 1402 peut aussi suivre la lettre « S » ou d'autres profils incurvés, par exemple la forme d'une bobine avec un nombre quelconque de boucles, après s'être écartée de la direction verticale. Dans une application, la mise en œuvre présentée sur la [Fig.14] est utilisée avec le procédé du point d'injection à rétraction contrôlée, ce qui signifie que le point d'injection pour le fluide 452 se déplace le long de la direction 1420 sur la figure, ce qui étend la zone de combustion de la veine de charbon. Pour cette configuration, le puits 1402 est configuré pour recevoir un outil 1320 qui comporte les tuyaux interne et externe 510 et 520 présentés précédemment par renvoi à la [Fig.5], mais pas le sabot 530. En d'autres termes, la configuration de l'outil 1320 dans ce mode de réalisation peut être similaire à celle du mode de réalisation présenté sur la [Fig.13]. Cependant, dans une mise en œuvre, l'outil 420 peut être utilisé à la place de l'outil 1320.

[0095] Une mise en œuvre propre et sûre de ces technologies nécessite une évaluation et une atténuation appropriées des risques. Les risques suivants, en particulier, peuvent être étroitement surveillés : pollution de l'eau souterraine, fuite de gaz, et mouvements du sol. Concernant la pollution de l'eau souterraine, selon le contexte géologique et hydrogéologique, les éléments polluants piégés dans les cendres de combustion 406 peuvent être lixiviés par l'eau souterraine après inondation de la cavité par entrée d'eau souterraine. Dans une application, l'atténuation des risques est basée sur le maintien de la pression de la cavité en dessous de la pression hydrostatique environnante, pour favoriser la rétention de tout fluide contaminé à l'intérieur de la cavité. Concernant les fuites de gaz, pendant et après l'oxydation du charbon, il existe un risque de libération de gaz dans les couches de couverture et dans l'atmosphère si la cavité n'est pas confinée par un terrain de couverture imperméable, ou si des discontinuités fournissent une connectivité perméable depuis la cavité jusqu'au terrain de couverture et/ou jusqu'à la surface. Ainsi, ces facteurs devraient être surveillés. Concernant les

mouvements du sol, selon le contexte géologique, y compris la profondeur et l'épaisseur des veines de charbon ciblées, un effondrement peut être rencontré. Pour atténuer ce risque, un système de piliers et de cavités peut être employé.

- [0096] En plus d'une bonne conception de l'opération pour empêcher ces risques, il est souhaitable de surveiller les sites concernés pour mettre en place une prévention des risques. Dans une application, il est possible de mettre en œuvre des systèmes DAS, présentés précédemment par renvoi à la [Fig.11A], par exemple cimentés derrière le tubage des différents puits (puits de production et d'injection, mais aussi outils coaxiaux avec sabot et serpentins coaxiaux). Ces systèmes permettent de surveiller la température – pour surveiller et réguler l'extraction de chaleur, la pression – pour maintenir la cavité pressurisée par rapport aux aquifères environnants, la sismicité – qui peut indiquer la création ou le cisaillement de failles et de fractures, qui peuvent constituer la voie pour une fuite de gaz.
- [0097] En outre, il est possible d'employer un réseau de capteurs sismiques (voir le réseau 1130 sur la [Fig.11A]) à la surface (enterré en cas d'environnements bruyants) comme système supplémentaire pour détecter et localiser la création ou le cisaillement de failles et de fractures. Parmi les autres procédés de prévention des risques possibles, on citera les études gravitationnelles et électromagnétiques (EM) répétitives pour « visualiser » les emplacements des cavités et leur taille dans le sol. Selon le contexte géologique, les procédés avec une source active tels que le CSEM (EM à source contrôlée) peuvent donner une bonne reproductibilité, ce qui permet de mesurer l'évolution de la cavité dans le temps, et/ou le radar interférométrique à synthèse d'ouverture (INSAR) et autres capteurs géodésiques pour surveiller les mouvements du sol.
- [0098] Une méthodologie d'optimisation de la conception des systèmes d'extraction de chaleur et de surveillance va maintenant être présentée. L'optimisation de la conception de l'extraction de chaleur est basée sur des simulations numériques hydrothermiques comportant des données spécifiques du site et utilisant des conceptions génériques devant être adaptées au contexte afin d'accélérer le déroulement des opérations. Une conception de la surveillance est contenue dans la séquence des opérations illustrée sur la [Fig.15]. Le procédé comprend une étape 1500 de réception de données spécifiques du site, par exemple un ou plusieurs éléments parmi un modèle géologique, des propriétés pétrochimiques, des propriétés thermiques, etc. Des données supplémentaires peuvent être stockées à l'étape 1502 dans une base de données de propriétés, par exemple des propriétés associées au charbon, des vitesses de combustion, des quantités d'oxygène, etc. Les paramètres manquants dans les différents modèles sont complétés avec les données issues de la base de données de propriétés. À l'étape 1504, un ou plusieurs modèles génériques, par exemple un

système de surveillance, des conceptions tests, sont entrés dans le système par l'opérateur de la veine de charbon. Un ajustement aux conditions spécifiques du site peut être effectué à l'étape 1506, sur la base des conditions pratiques au niveau du site, par exemple la géométrie, la géologie, la conception UCG si elle est prédéfinie, les propriétés pétrophysiques et thermiques si elles sont disponibles. À l'étape 1508, diverses simulations hydrothermiques sont effectuées pour le site sur la base des données d'entrée. Une estimation de l'énergie produite est calculée à l'étape 1510, par exemple sur la base du nombre de puits pour les outils 420, des matériaux utilisés pour les outils 420, de la profondeur des outils, etc. À l'étape 1512, les résultats de ces simulations sont comparés à d'autres conceptions reçues à l'étape 1504, et des ajustements aux conditions spécifiques du site sont réalisés à l'étape 1514. Enfin, à l'étape 1516, le système de surveillance et la conception de l'extraction sont optimisés et une conception finale est générée.

- [0099] Les simulations indiquées ci-dessus peuvent être lancées au moyen d'un modèle informatique entièrement couplé d'écoulement hydrothermique multiphasique (phases liquide et gazeuse). Un fluide peut s'écouler dans la matrice rocheuse, dans les failles/fractures le cas échéant, et dans la cavité. Les modèles génériques prédéfinis reçus à l'étape 1504 peuvent impliquer une géologie générique (veines de charbon à la fois horizontale et inclinée) à une profondeur appropriée (comme 1 km) et des propriétés pétrophysiques et thermiques génériques basées sur les gammes de données disponibles dans la base de données associée.
- [0100] Les technologies exposées précédemment peuvent être mises en œuvre sous la forme de divers procédés sur le terrain. Pour simplifier, seuls deux de ces procédés sont décrits dans les présentes, mais l'homme du métier comprendra que des variantes de ces procédés sont possibles. La configuration présentée sur la [Fig.4] va d'abord être décrite. Cette configuration peut être utilisée pour générer de l'électricité au niveau du générateur électrique 430, exclusivement sur la base de la différence de température du fluide 422 au niveau du sabot 530 (température T2) et au niveau du générateur électrique 430 (température T1, inférieure à T2).
- [0101] Plus spécifiquement, un procédé d'extraction de chaleur à partir d'un gisement 401 comporte, comme l'illustre schématiquement la [Fig.16], une étape 1600 de mise en place d'un ou plusieurs outils coaxiaux 420 dans le sous-sol, l'outil coaxial 420 ayant un tuyau externe 520 et un tuyau interne 510 situé à l'intérieur du tuyau externe 520. Le tuyau externe 520 et le tuyau interne 510 sont tous deux raccordés à un sabot 530 de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau 512 des tuyaux interne et externe, atteint le sabot 530, puis circule à travers un alésage 514 du tuyau interne 510, seul le sabot 530 étant en contact avec une veine de charbon 401 située dans le sous-sol. On notera que la circulation peut être inversée, autrement dit le fluide circule d'abord à

travers l'alésage 514, vient en contact avec le sabot 530, puis circule en remontant l'anneau 512.

- [0102] À l'étape 1602, qui est facultative, le puits de production 454 est raccordé fluidiquement à une unité de traitement chimique 410, qui est configurée pour recevoir du gaz de synthèse 407 issu de la combustion de la veine de charbon située dans le sous-sol, et est également configurée pour extraire du CO₂ du gaz de synthèse 407. On notera que l'unité de traitement chimique peut être une raffinerie, une usine chimique, etc. À l'étape 1604, un générateur électrique 430 est raccordé fluidiquement à l'unité de traitement chimique 410 pour recevoir le fluide 422. Le générateur électrique est aussi raccordé fluidiquement avec un premier orifice au tuyau interne 510 et avec un deuxième orifice 430B au tuyau externe 520 de l'outil coaxial 420. À l'étape 1606, le générateur électrique produit de l'énergie électrique, exclusivement sur la base d'une différence de température du fluide 422 au niveau du générateur électrique 430 et au niveau de l'outil coaxial 420.
- [0103] Le procédé peut également comporter une étape de séparation de CO₂ du gaz de synthèse dans l'unité de traitement chimique, et une étape de compression du CO₂ pour fabriquer du CO₂ supercritique à utiliser comme le fluide. Le procédé peut aussi comporter une étape de circulation du CO₂ supercritique à travers l'anneau et l'alésage de l'outil coaxial pour qu'il atteigne le sabot et extraie de la chaleur de la veine de charbon en combustion, et une étape de circulation du CO₂ supercritique chauffé à travers le générateur électrique pour produire de l'énergie électrique. Éventuellement, le procédé peut comporter une étape d'injection d'air ou d'oxygène dans la veine de charbon pour soutenir la combustion, et/ou une étape d'extraction de H₂ du gaz de synthèse avec l'unité de traitement chimique. Quand le processus est considéré comme n'étant pas économiquement viable, le procédé peut comporter l'étape d'injection du CO₂ supercritique dans une cavité formée à la place de la veine de charbon brûlé, et des puits de scellement raccordés à la cavité pour stocker le CO₂ dans le sous-sol.
- [0104] Les configurations montrées sur les [Fig.13] et 14 peuvent être mises en œuvre dans le procédé qui va être présenté par renvoi à la [Fig.17]. Ce procédé d'extraction de chaleur à partir d'un gisement comporte une étape 1700 de mise en place d'un ou plusieurs outils coaxiaux 1320 dans le sous-sol, l'outil coaxial 1320 ayant un tuyau externe 520 et un tuyau interne 510 situé à l'intérieur du tuyau externe 520, et étant configuré de telle sorte qu'un fluide 422 circule à travers un anneau 512 des tuyaux interne et externe, atteint une extrémité fermée 520A du tuyau externe 520, puis circule à travers un alésage 514 du tuyau interne 510. La circulation du fluide peut être inversée, pour qu'il circule d'abord à travers l'alésage 514 et ensuite à travers l'anneau 512.
- [0105] À l'étape 1702, un puits de production 454 est raccordé fluidiquement à une unité de

traitement chimique 410, qui est configurée pour recevoir du gaz de synthèse 407 issu de la combustion de la veine de charbon située dans le sous-sol, et configurée pour extraire du CO₂ du gaz de synthèse 407. On notera que cette étape est facultative. À l'étape 1704, un générateur électrique 430 est raccordé fluidiquement à l'unité de traitement chimique 410 pour recevoir le fluide 422, et est aussi raccordé fluidiquement, avec un premier orifice du générateur électrique, au tuyau interne 510, et raccordé fluidiquement, avec un deuxième orifice du générateur électrique, au tuyau externe 520 de l'outil coaxial 1320. À l'étape 1706, de l'énergie est produite avec le générateur électrique, exclusivement sur la base d'une différence de température du fluide 422 au niveau du générateur électrique et au niveau de l'outil coaxial.

- [0106] Le procédé peut également comporter une étape de déploiement de l'outil coaxial dans un plan en dessous d'un fond de la veine de charbon, et le plan fait un angle non nul avec un plan horizontal, et/ou une étape de déploiement de l'outil coaxial pour qu'il suive un chemin en forme de serpent dans le plan.
- [0107] Le terme « environ » est utilisé dans cette demande pour signifier une variation allant jusqu'à 20 % du paramètre caractérisé par ce terme. On comprendra que, bien que les termes « premier », « deuxième », etc., puissent être utilisés dans les présentes pour décrire divers éléments, ces éléments ne doivent pas être limités par ces termes. Ces termes sont uniquement utilisés pour distinguer un élément d'un autre. Par exemple, un premier objet ou une première étape pourrait être appelé un deuxième objet ou une deuxième étape et, similairement, un deuxième objet ou une deuxième étape pourrait être appelé un premier objet ou une première étape, sans s'écarter de la portée du présent exposé. Le premier objet ou la première étape, et le deuxième objet ou la deuxième étape, sont tous deux des objets ou des étapes, respectivement, mais ils ne sont pas considérés comme le même objet ou la même étape.
- [0108] La terminologie utilisée dans la présente description a pour but de décrire des modes de réalisation particuliers et n'est pas destinée à être limitative. Telles qu'utilisées dans cette description et les revendications annexées, les formes au singulier « un », « une » « le » et « la » sont destinées à inclure aussi les formes au pluriel, sauf si le contexte indique clairement le contraire. On comprendra également que le terme « et/ou », tel qu'utilisé dans les présentes, fait référence à et englobe toutes les combinaisons possibles d'un ou plusieurs des éléments énumérés associés. On comprendra aussi que les termes « inclut », « incluant », « comporte », « comportant », « y compris », « notamment », « comprend » et/ou « comprenant », quand ils sont utilisés dans cette spécification, indiquent la présence d'attributs, entiers, étapes, opérations, éléments et/ou composants indiqués, mais n'excluent pas la présence ou l'ajout d'un ou plusieurs autres attributs, entiers, étapes, opérations, éléments, composants et/ou groupes de ceux-ci. En outre, tel qu'utilisé ici, le terme « si » peut être interprété comme signifiant

« quand » ou « lorsque » ou « en réponse à la détermination » ou « en réponse à la détection », selon le contexte.

[0109] Les modes de réalisation décrits concernent différents procédés destinés à placer un ou plusieurs outils coaxiaux avec ou sans sabot dans un gisement, pour extraire de la chaleur, quand le gisement présente un ou plusieurs paramètres extrêmes, comme une température élevée. On comprendra que cette description n'est pas destinée à limiter l'invention. Au contraire, les modes de réalisation sont destinés à englober les alternatives, modifications et équivalents, qui sont inclus dans l'esprit et la portée de l'invention tels que définis par les revendications annexées. En outre, dans la description détaillée des modes de réalisation, de nombreux détails spécifiques sont exposés afin d'apporter une compréhension globale de l'invention revendiquée. Cependant, l'homme du métier comprendra que divers modes de réalisation peuvent être pratiqués sans de tels détails spécifiques.

[0110] Bien que les attributs et éléments des présents modes de réalisation soient décrits dans les modes de réalisation dans des combinaisons particulières, chaque attribut ou élément peut être utilisé seul sans les autres attributs et éléments des modes de réalisation ou dans diverses combinaisons avec ou sans autres attributs et éléments décrits dans les présentes.

[0111] Cette description manuscrite utilise des exemples de l'objet décrit pour permettre à toute personne expérimentée de pratiquer celui-ci, y compris fabriquer et utiliser tous dispositifs ou systèmes et effectuer tous procédés incorporés. La portée brevetable de l'objet est définie par les revendications, et peut inclure d'autres exemples qui apparaîtront à l'homme du métier. Ces autres exemples sont destinés à se situer dans la portée des revendications.

Références

[0112] La totalité du contenu de toutes les publications dont la liste est donnée dans les présentes est intégrée par renvoi dans cette demande de brevet.

[0113] 1 - Jiang, L., Xue, D., Wei, Z., Chen, Z., Mirzayev, M., Chen, Y. et Chen, S. (2022). Coal decarbonization: A state-of-the-art review of enhanced hydrogen production in underground coal gasification. *Energy Reviews*, 1(1). doi.org/10.1016/j.enrev.2022.100004.

[0114] 2 - Yang, L., Zhang, X.Y. et Zhu, K.J. (2016). Hydrogen production in underground coal gasification (UCG). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(3), pp.376–383. doi.org/10.1080/15567036.2013.770106.

[0115] 3 - Olateju, B. et Kumar, A. (2013). Techno-economic assessment of hydrogen production from underground coal gasification (UCG) in Western Canada with carbon capture and sequestration (CCS) for upgrading bitumen from oil sands. *Applied*

- Energy, 111, pp.428-440. doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.014.
- [0116] 4 - Stańczyk, K., Kapusta, K., Wiatowski, M., Świądrowski, J., Smoliński, A., Rogut, J. et Kotyrba, A. (2012). Experimental simulation of hard coal underground gasification for hydrogen production. *Fuel*, 91(1), pp.40-50. doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.024.
- [0117] 5 - Jiang, L., Chen, Z., Farouq Ali, S.M., Zhang, J., Chen, Y. et Chen, S. (2022). Storing carbon dioxide in deep unmineable coal seams for centuries following underground coal gasification. *Journal of Cleaner Production*, 378, p.134565. doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134565.
- [0118] 6 - Otto, C., Kempka, T., Kapusta, K. et Stańczyk, K. (2016). Fault Reactivation Can Generate Hydraulic Short Circuits in Underground Coal Gasification—New Insights from Regional-Scale Thermo-Mechanical 3D Modeling. *Minerals*, 6(4), pp.101–119. doi.org/10.3390/min6040101.
- [0119] 7 - Brevet chinois n° CN106121617.
- [0120] 8 - Brevet chinois n° CN102434143.
- [0121] 9 - Brevet chinois n° CN109779600.
- [0122] 10 - Brevet chinois n° CN209586351.
- [0123] 11 - Brevet US n° US4,019,577.
- [0124] 12 - Brevet chinois n° CN215408574.
- [0125] 13 - Brevet chinois n° CN108534380.
- [0126] 14 - Brevet chinois n° CN114837648.
- [0127] 15 - Brevet chinois n° CN113863910.
- [0128] 16 - Brevet chinois n° CN111022026.
- [0129] 17 - Burchart-Korol, D., Korol, J. et Czaplicka-Kolarz, K., 2016. Life cycle assessment of heat production from underground coal gasification. *Int J Life Cycle Assess*, 21:1391–1403, DOI 10.1007/s11367-016-1102-0.
- [0130] 18 - Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A. et Tassou, S.A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, [en ligne] 6, pp.268–289.
- [0131] 19 - Brevet US n° 10/816,241.
- [0132] 20 - Brevet chinois n° CN106026778A.
- [0133] 21 - Brevet chinois n° CN212867523.
- [0134] 22 - Publication de demande internationale WO 2017/103950.

Revendications

- [Revendication 1] Système d'extraction de chaleur (400) destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, le système comprenant :
- un outil coaxial (420) configuré pour être placé dans le sous-sol, l'outil coaxial (420) ayant un tuyau externe (520) et un tuyau interne (510) situé à l'intérieur du tuyau externe (520), le tuyau externe (520) et le tuyau interne (510) étant tous deux raccordés à un sabot (530) de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau (512) défini par les tuyaux interne et externe, atteint le sabot (530), et circule à travers un alésage (514) du tuyau interne (510) ; et
- un générateur électrique (430) raccordé fluidiquement à une unité de traitement chimique (410) pour recevoir un fluide (422), et aussi raccordé fluidiquement avec un premier orifice au tuyau interne (510), et avec un deuxième orifice au tuyau externe (520) de l'outil coaxial (420),
- dans lequel une différence de température du fluide (422) au niveau du générateur électrique (430) et au niveau de l'outil coaxial (420) conduit le générateur électrique (430) à produire de l'énergie.
- [Revendication 2] Système d'extraction de chaleur selon la revendication 1, comprenant en outre :
- une unité de traitement chimique (410) configurée pour recevoir du gaz de synthèse (407) issu d'une veine de charbon en combustion située dans le sous-sol, et pour extraire du CO₂ et du H₂ du gaz de synthèse (407) ; et
- un compresseur raccordé fluidiquement entre l'unité de traitement chimique et le générateur électrique pour fabriquer du CO₂ supercritique à utiliser comme le fluide.
- [Revendication 3] Système d'extraction de chaleur selon la revendication 1, dans lequel seul le sabot est configuré pour être placé dans la veine de charbon.
- [Revendication 4] Système d'extraction de chaleur selon la revendication 1, comprenant en outre :
- un compresseur supplémentaire (453) configuré pour pomper de l'air ou de l'oxygène à l'intérieur de la veine de charbon pour favoriser la combustion du charbon.
- [Revendication 5] Système d'extraction de chaleur selon la revendication 1, dans lequel le sabot (530) est constitué d'un matériau qui supporte des températures supérieures à 500 °C, le tuyau externe (520) est attaché au sabot (530),

le tuyau interne (510) est situé concentriquement à l'intérieur du tuyau externe (520) et forme l'anneau (512) avec le tuyau externe (520), et l'outil coaxial comporte en outre :

un raccord souple (540) configuré pour raccorder le tuyau externe (520) au sabot (530) de telle sorte que le tuyau externe (520) peut se dilater et se contracter sans fuite du fluide (422) à l'intérieur de l'anneau (512), dans lequel le tuyau interne (510) et le tuyau externe (520) sont configurés pour former une boucle ininterrompue (556) pour le fluide (422) entre un sommet de l'anneau (512) et un sommet de l'alésage (514) tout en permettant également au fluide (422) d'entrer en contact direct avec le sabot (530).

[Revendication 6]

Système d'extraction de chaleur selon la revendication 5, dans lequel l'outil coaxial comprend en outre :

un élément faisant crépine (150) situé entre le tuyau interne et le sabot ;
et

un raccord souple supplémentaire entre le tuyau interne et l'élément faisant crépine,

dans lequel la boucle s'étend depuis l'anneau jusqu'à l'alésage par une pluralité de trous formés dans l'élément faisant crépine.

[Revendication 7]

Procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, le procédé comprenant :

la mise en place (1600) d'un ou plusieurs outils coaxiaux (420) dans le sous-sol, l'outil coaxial (420) ayant un tuyau externe (520) et un tuyau interne (510) situé à l'intérieur du tuyau externe (520), le tuyau externe (520) et le tuyau interne (510) étant tous deux raccordés à un sabot (530) de telle sorte qu'un fluide circule à travers un anneau (512) des tuyaux interne et externe, atteint le sabot (530), et circule également à travers un alésage (514) du tuyau interne (510), seul le sabot (530) étant en contact avec une veine de charbon (401) située dans le sous-sol ;
le raccordement fluïdique (1604) d'un générateur électrique (430) à une unité de traitement chimique (410) pour recevoir un fluide (422), et aussi le raccordement fluïdique d'un premier orifice du générateur électrique (430) au tuyau interne (510) et le raccordement d'un deuxième orifice du générateur électrique (430) au tuyau externe (520) de l'outil coaxial (420) ; et

la production (1606) d'énergie avec le générateur électrique (430), exclusivement sur la base d'une différence de température du fluide (422) au niveau du générateur électrique (430) et au niveau de l'outil coaxial

- (420).
- [Revendication 8] Procédé selon la revendication 7, comprenant en outre :
le raccordement fluide (1602) d'un puits de production (454) à une unité de traitement chimique (410), qui est configurée pour recevoir du gaz de synthèse (407) issu de la combustion de la veine de charbon située dans le sous-sol, et configurée pour extraire du CO₂ du gaz de synthèse (407) ;
la séparation du CO₂ du gaz de synthèse dans l'unité de traitement chimique ; et
la compression du CO₂ pour fabriquer du CO₂ supercritique à utiliser comme le fluide.
- [Revendication 9] Procédé selon la revendication 8, comprenant en outre :
la circulation du CO₂ supercritique à travers l'anneau et l'alésage de l'outil coaxial pour qu'il atteigne le sabot et extraie de la chaleur de la veine de charbon en combustion ; et
la circulation du CO₂ supercritique chauffé à travers le générateur électrique pour produire de l'énergie électrique.
- [Revendication 10] Procédé selon la revendication 7, comprenant en outre :
l'injection d'air ou d'oxygène dans la veine de charbon pour soutenir la combustion.
- [Revendication 11] Procédé selon la revendication 8, comprenant en outre :
l'extraction de H₂ du gaz de synthèse avec l'unité de traitement chimique.
- [Revendication 12] Procédé selon la revendication 8, comprenant en outre :
l'injection du CO₂ supercritique dans une cavité formée à la place de la veine de charbon brûlé ; et
le scellement de puits reliés à la cavité pour stocker le CO₂ dans le sous-sol.
- [Revendication 13] Système d'extraction de chaleur (1300, 1400) destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, le système comprenant :
un outil coaxial (1320) configuré pour être placé dans le sous-sol, l'outil coaxial (1320) ayant un tuyau externe (520) et un tuyau interne (510) situé à l'intérieur du tuyau externe (520), et étant configuré de telle sorte qu'un fluide (422) circule à travers un anneau (512) des tuyaux interne et externe, atteint une extrémité fermée (520A) du tuyau externe (520), et circule également à travers un alésage (514) du tuyau interne (510) ;
et
un générateur électrique (430) raccordé fluidiquement à une unité de

traitement chimique (410) pour recevoir le fluide (422), et aussi raccordé fluidiquement avec un premier orifice au tuyau interne (510), et avec un deuxième orifice au tuyau externe (520) de l'outil coaxial (420),

dans lequel une différence de température du fluide (422) au niveau du générateur électrique (430) et au niveau de l'outil coaxial (420) conduit le générateur électrique (430) à produire de l'énergie.

[Revendication 14] Système d'extraction de chaleur selon la revendication 13, comprenant en outre :

une unité de traitement chimique (410) configurée pour recevoir du gaz de synthèse (407) issu d'une veine de charbon en combustion située dans le sous-sol, et pour extraire du CO₂ et du H₂ du gaz de synthèse (407) ; et

un compresseur raccordé fluidiquement entre l'unité de traitement chimique et le générateur électrique pour fabriquer du CO₂ supercritique à utiliser comme le fluide.

[Revendication 15] Système d'extraction de chaleur selon la revendication 13, dans lequel les tuyaux interne et externe sont configurés pour être placés à l'écart d'une verticale, sous un fond de la veine de charbon.

[Revendication 16] Système d'extraction de chaleur selon la revendication 13, comprenant en outre :

un compresseur supplémentaire (453) configuré pour pomper de l'air ou de l'oxygène à l'intérieur de la veine de charbon pour favoriser la combustion du charbon.

[Revendication 17] Système d'extraction de chaleur selon la revendication 13, dans lequel le tuyau interne (510) et le tuyau externe (520) sont configurés pour former une boucle ininterrompue (556) pour le fluide (422) entre un sommet de l'anneau (512) et un sommet de l'alésage (514) tout en permettant également au fluide (422) d'entrer en contact direct avec l'extrémité fermée (520A) du tuyau externe.

[Revendication 18] Procédé destiné à extraire de la chaleur d'un gisement, le procédé comprenant :

la mise en place (1700) d'un ou plusieurs outils coaxiaux (1320) dans le sous-sol, l'outil coaxial (1320) ayant un tuyau externe (520) et un tuyau interne (510) situé à l'intérieur du tuyau externe (520), et étant configuré de telle sorte qu'un fluide (422) circule à travers un anneau (512) des tuyaux interne et externe, atteint une extrémité fermée (520A) du tuyau externe (520), et circule également à travers un alésage (514) du tuyau

interne (510) ;

le raccordement fluïdique (1704) d'un générateur électrique (430)   une unité de traitement chimique (410) pour recevoir le fluide (422), et aussi le raccordement fluïdique d'un premier orifice du générateur électrique (430) au tuyau interne (510) et le raccordement d'un deuxième orifice du générateur électrique (430) au tuyau externe (520) de l'outil coaxial (1320) ; et

la production (1706) d'énergie avec le générateur électrique (430), exclusivement sur la base d'une différence de température du fluide (422) au niveau du générateur électrique (430) et au niveau de l'outil coaxial (1320).

[Revendication 19]

Procédé selon la revendication 18, comprenant en outre :

le déploiement de l'outil coaxial dans un plan en dessous d'un fond de la veine de charbon, le plan faisant un angle non nul avec un plan horizontal.

[Revendication 20]

Procédé selon la revendication 19, comprenant en outre :

le déploiement de l'outil coaxial pour qu'il suive un chemin en forme de serpent in dans le plan.

[Fig. 1A]

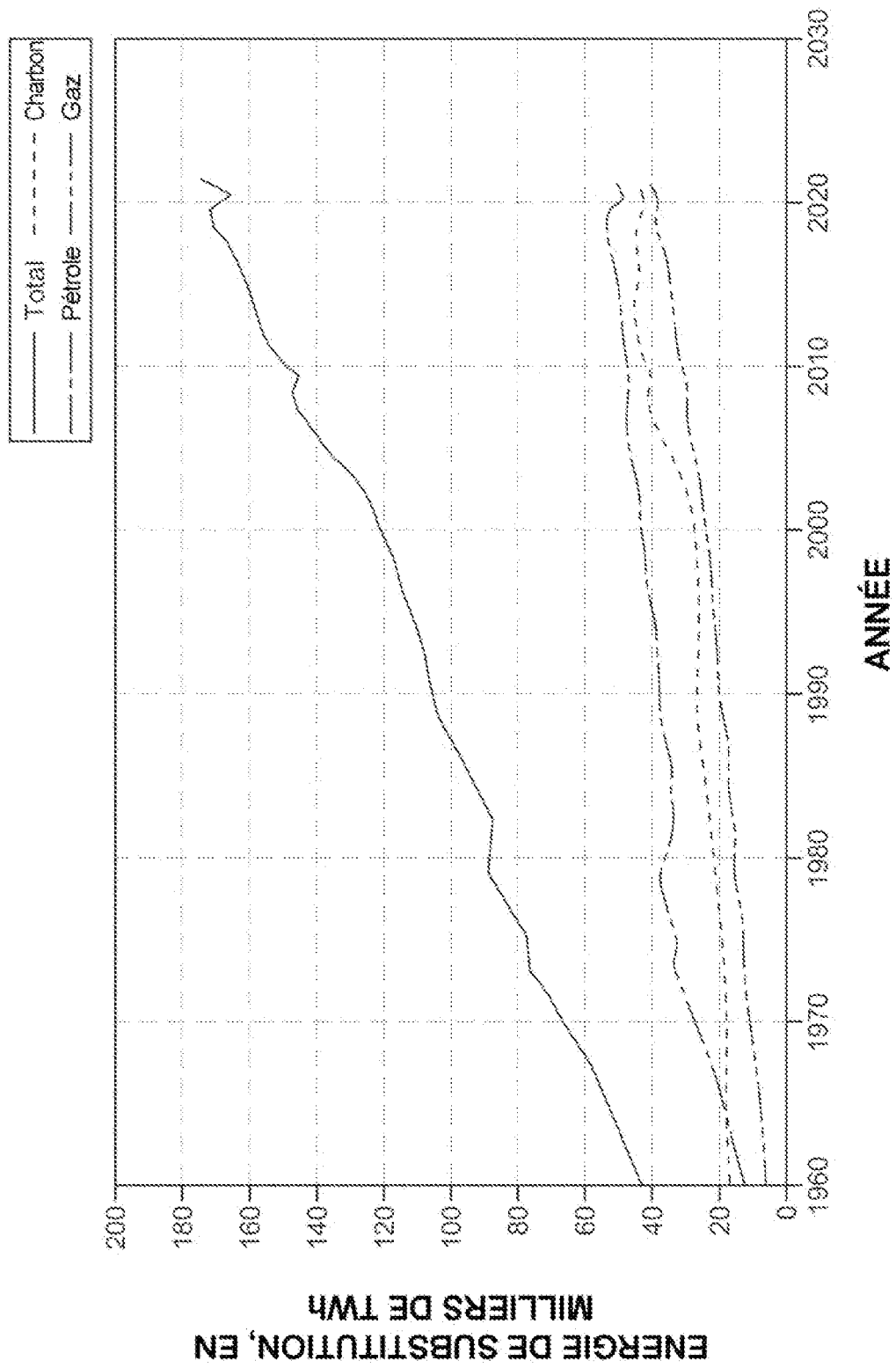


FIG. 1A

[Fig. 1B]

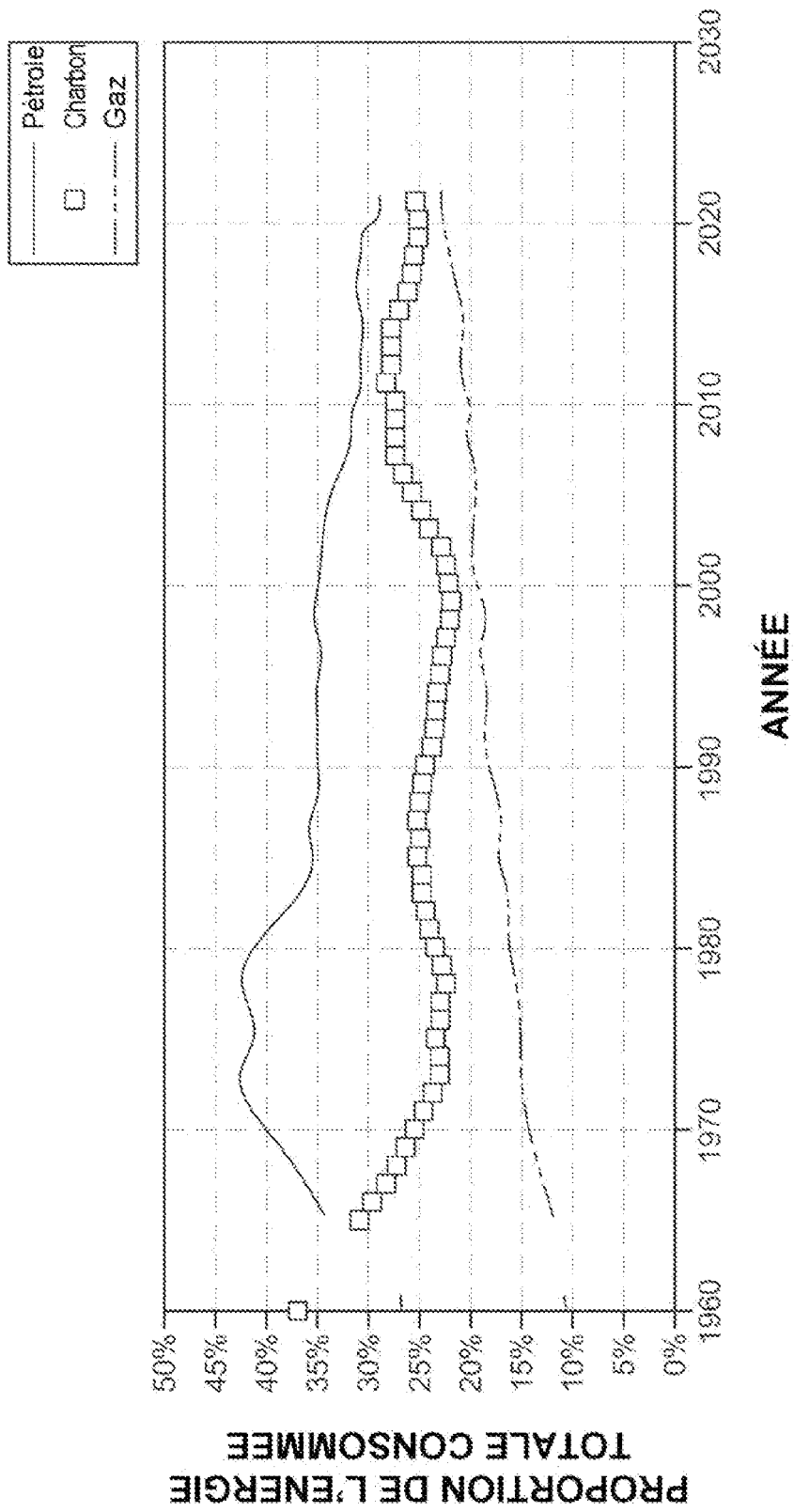


FIG. 1B

[Fig. 2A]

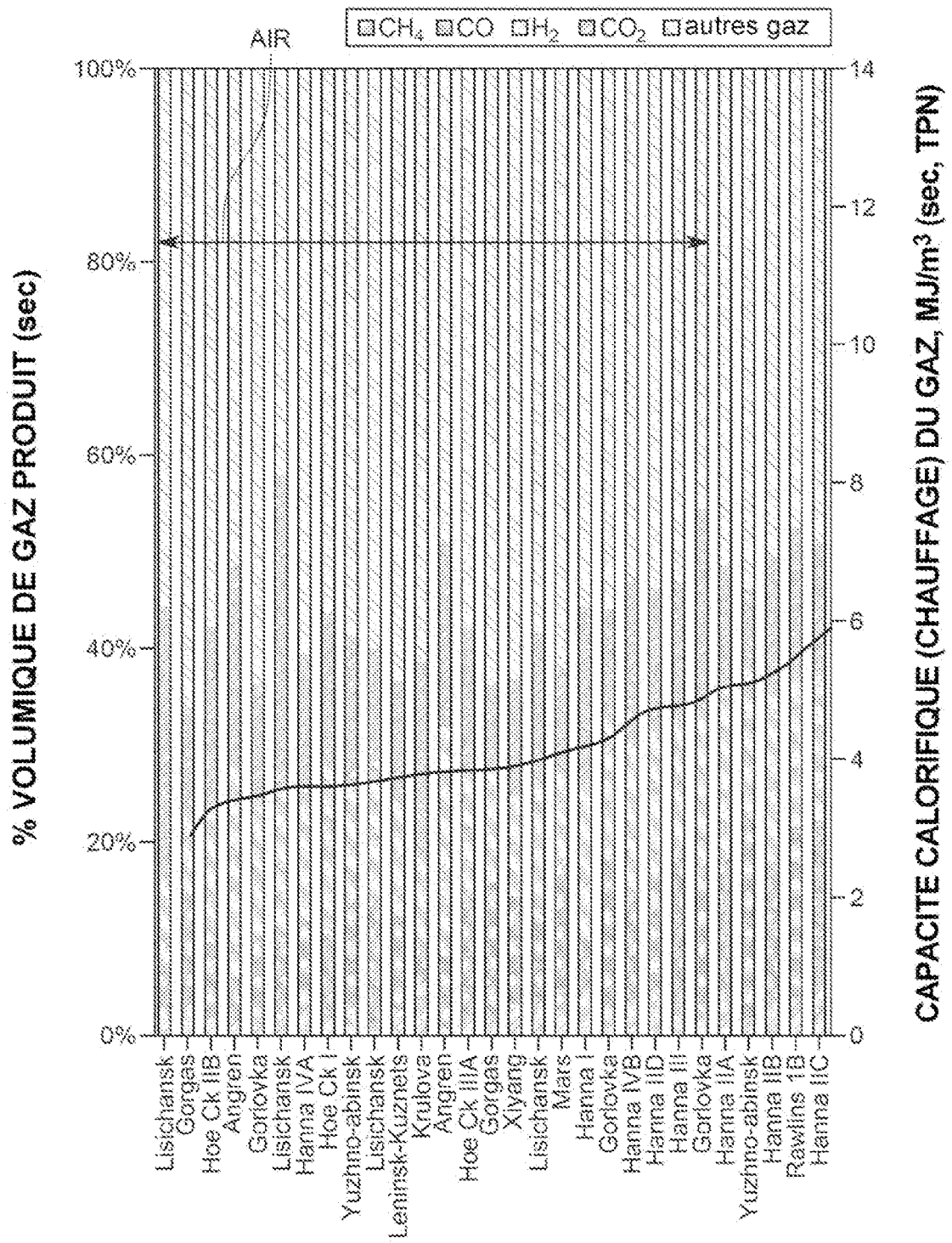


FIG. 2A

[Fig. 2B]

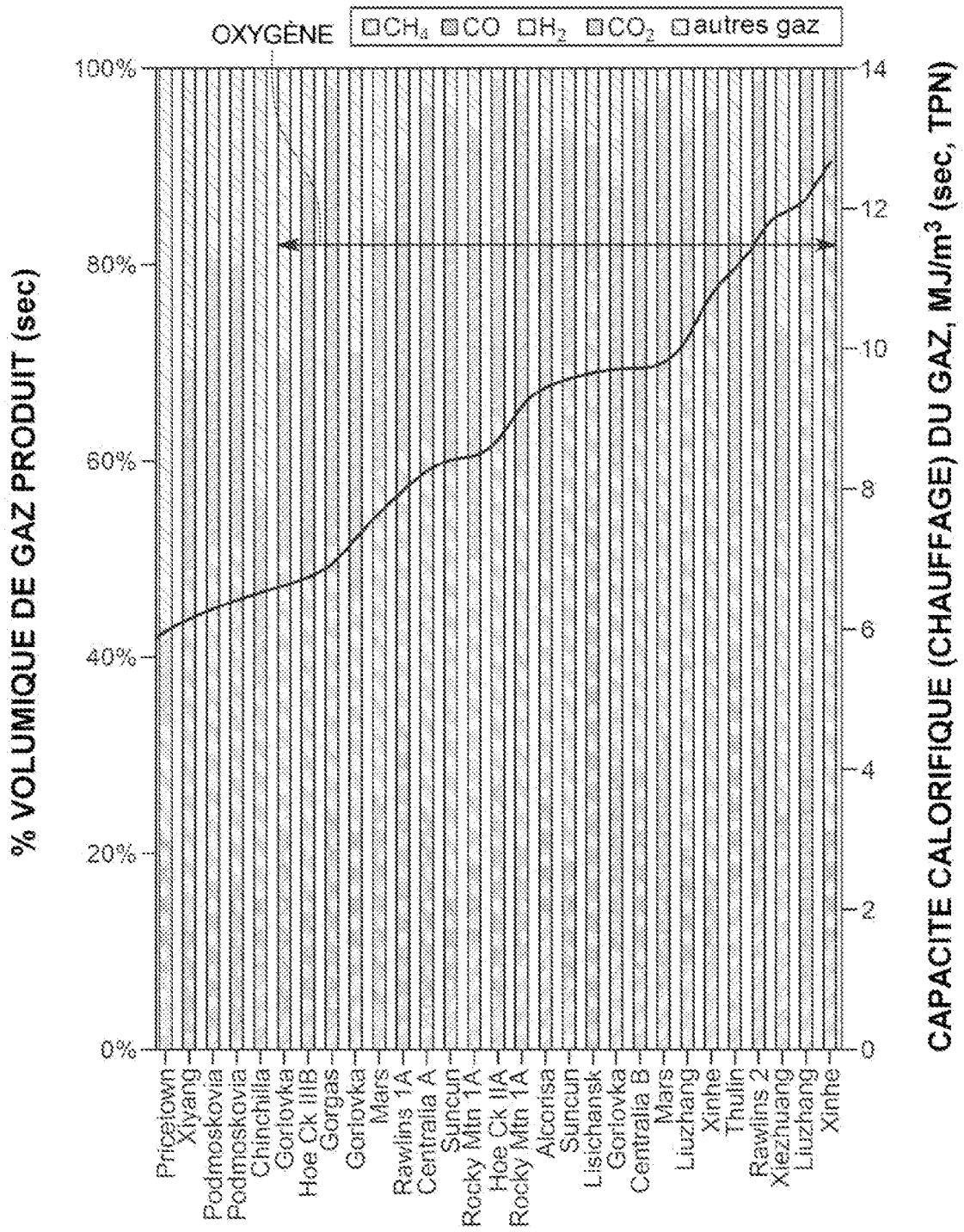


FIG. 2B

[Fig. 3]

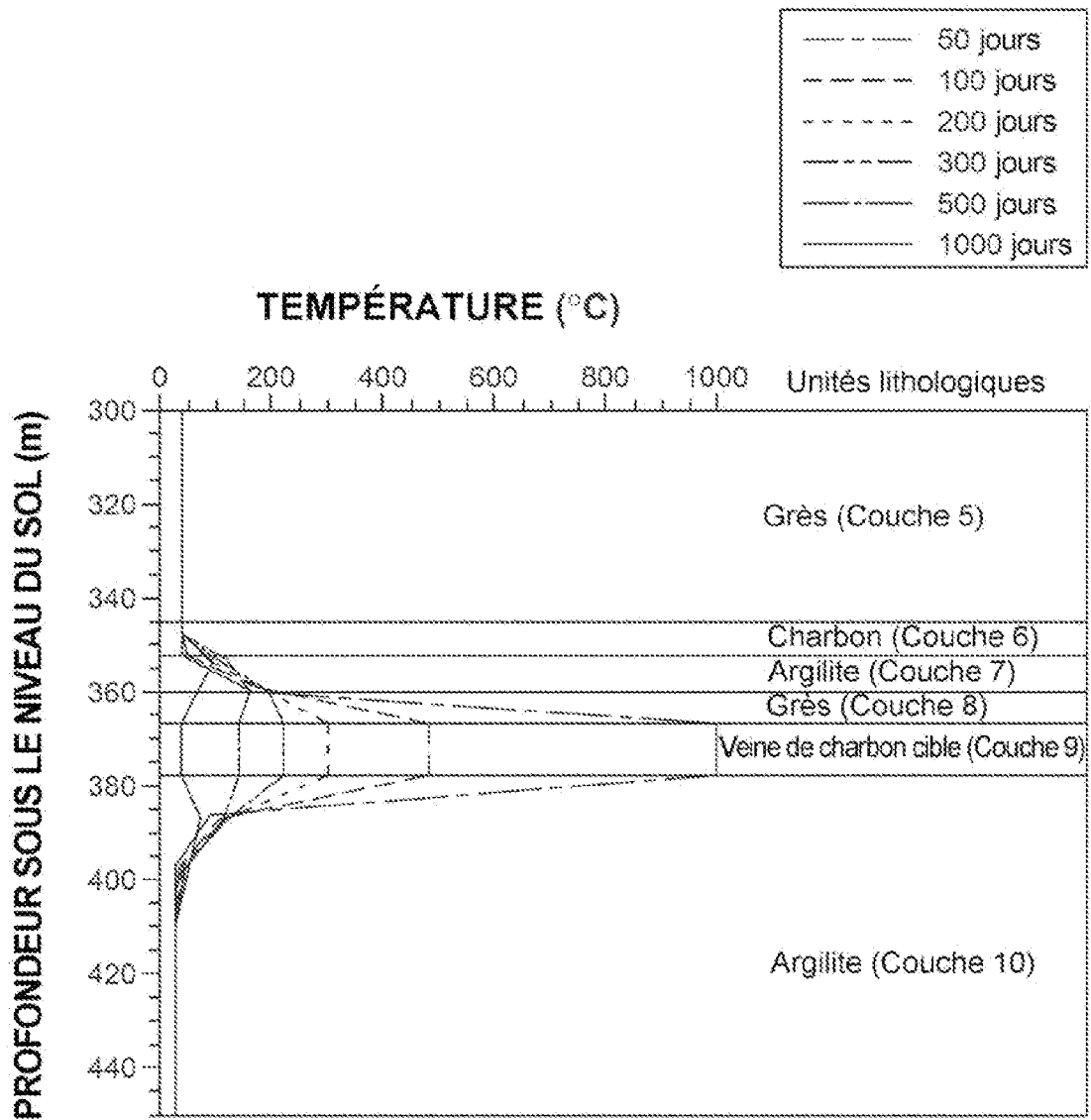


FIG. 3

[Fig. 4]

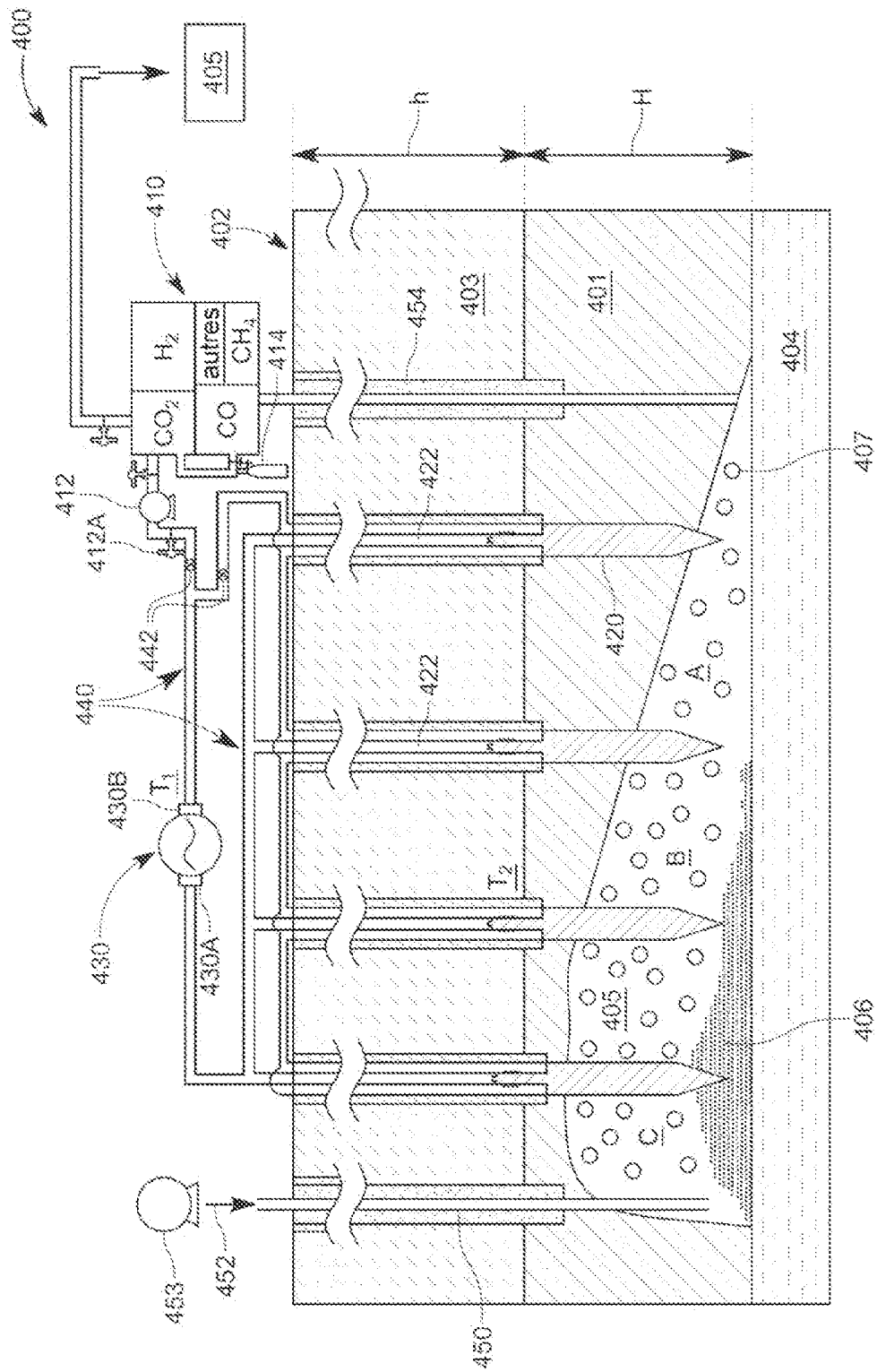


FIG. 4

[Fig. 5]

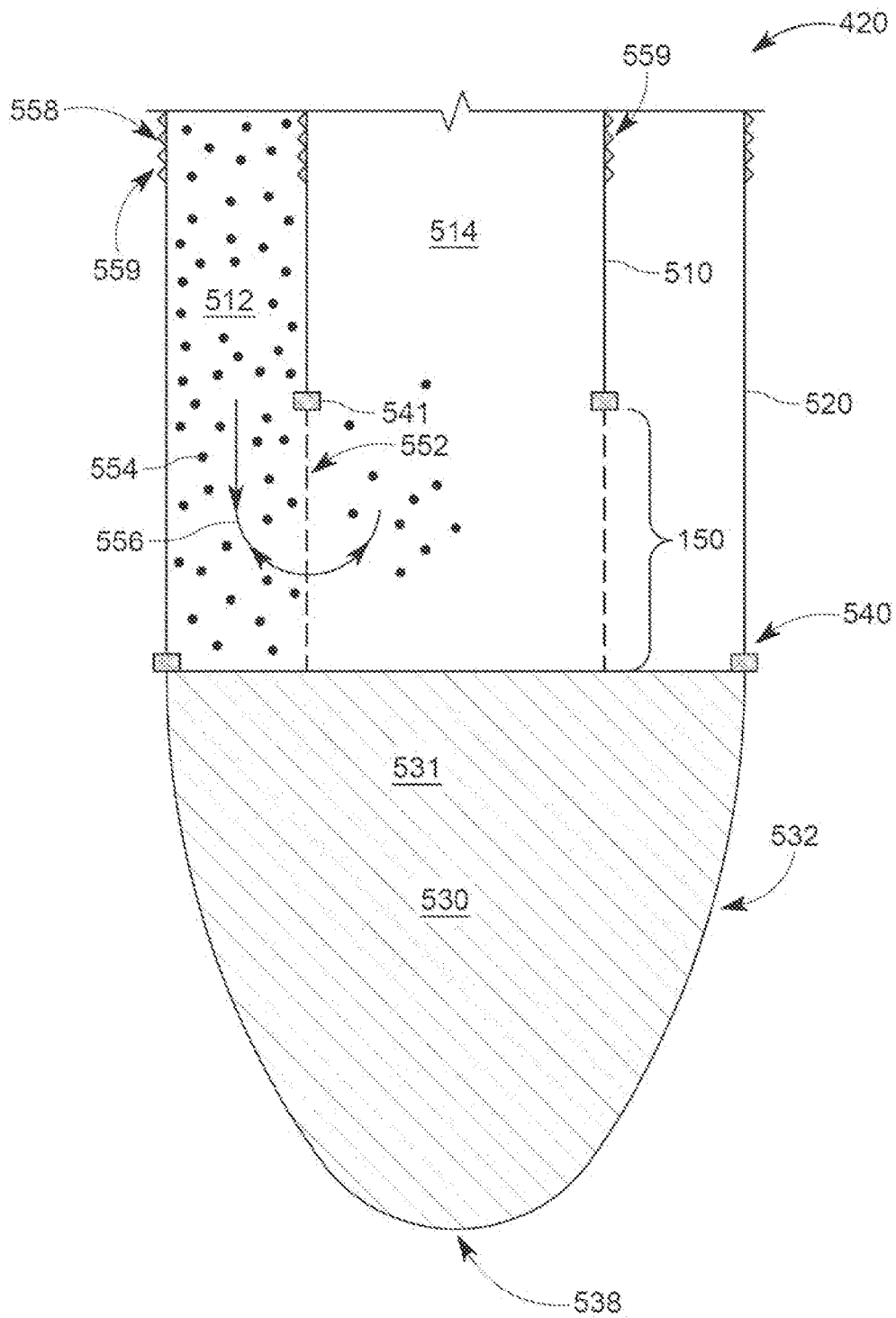


FIG. 5

[Fig. 6A]

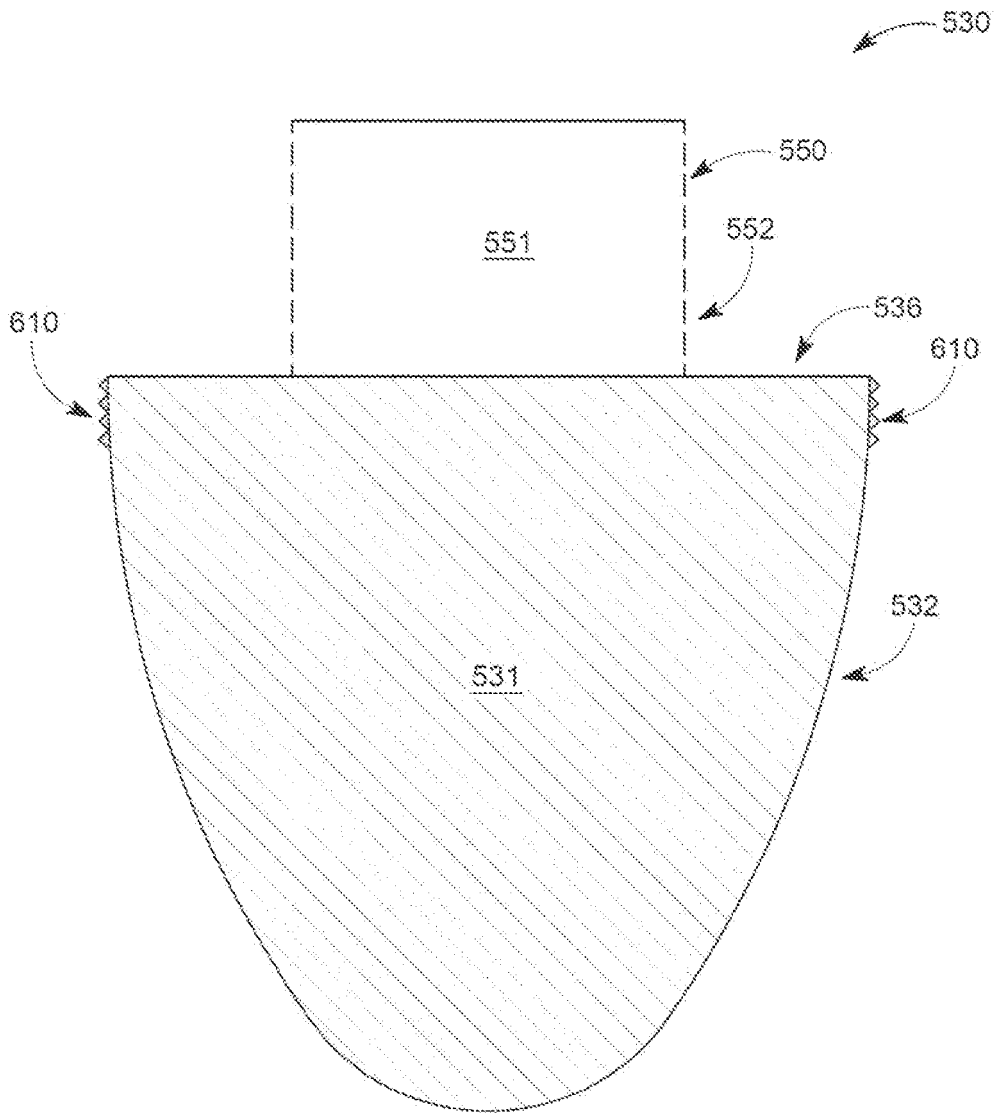


FIG. 6A

[Fig. 6B]

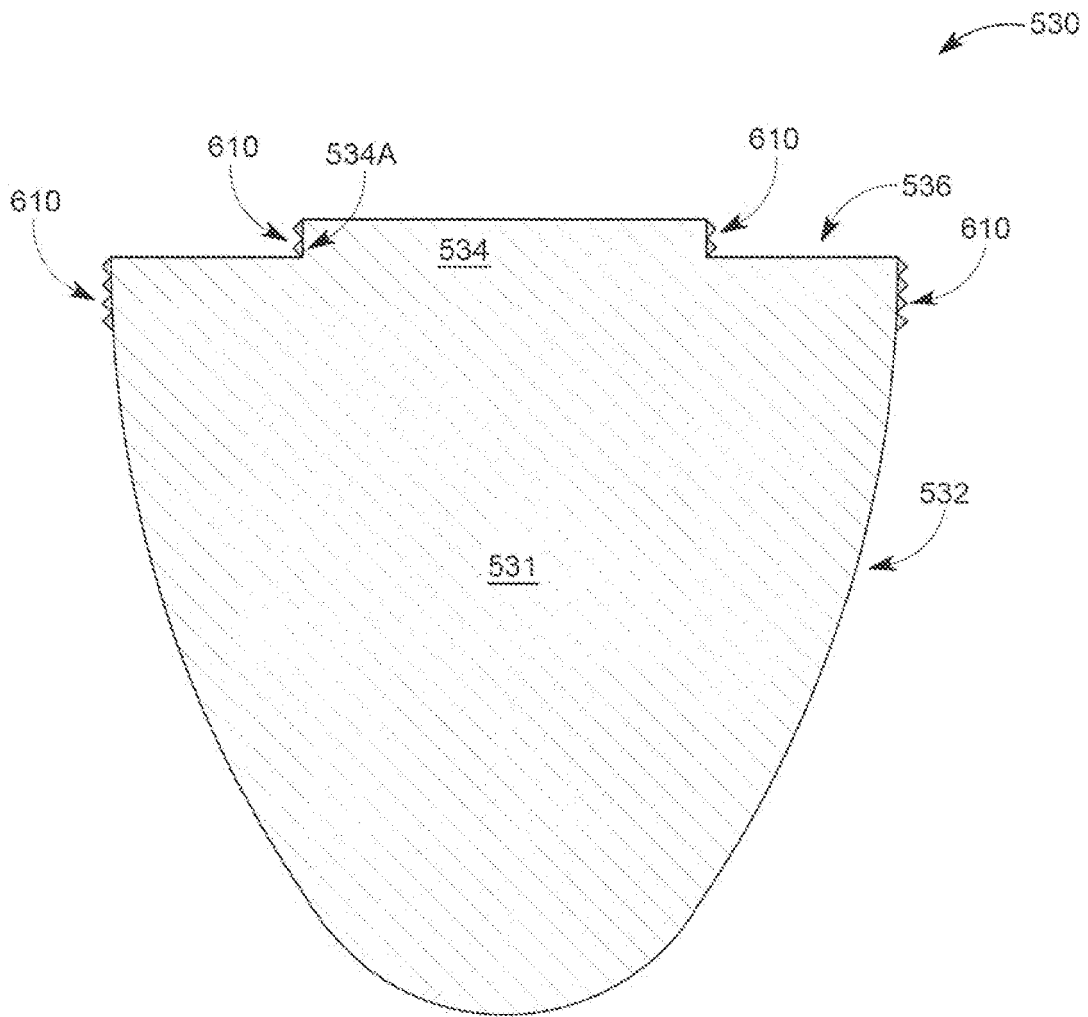


FIG. 6B

[Fig. 7]

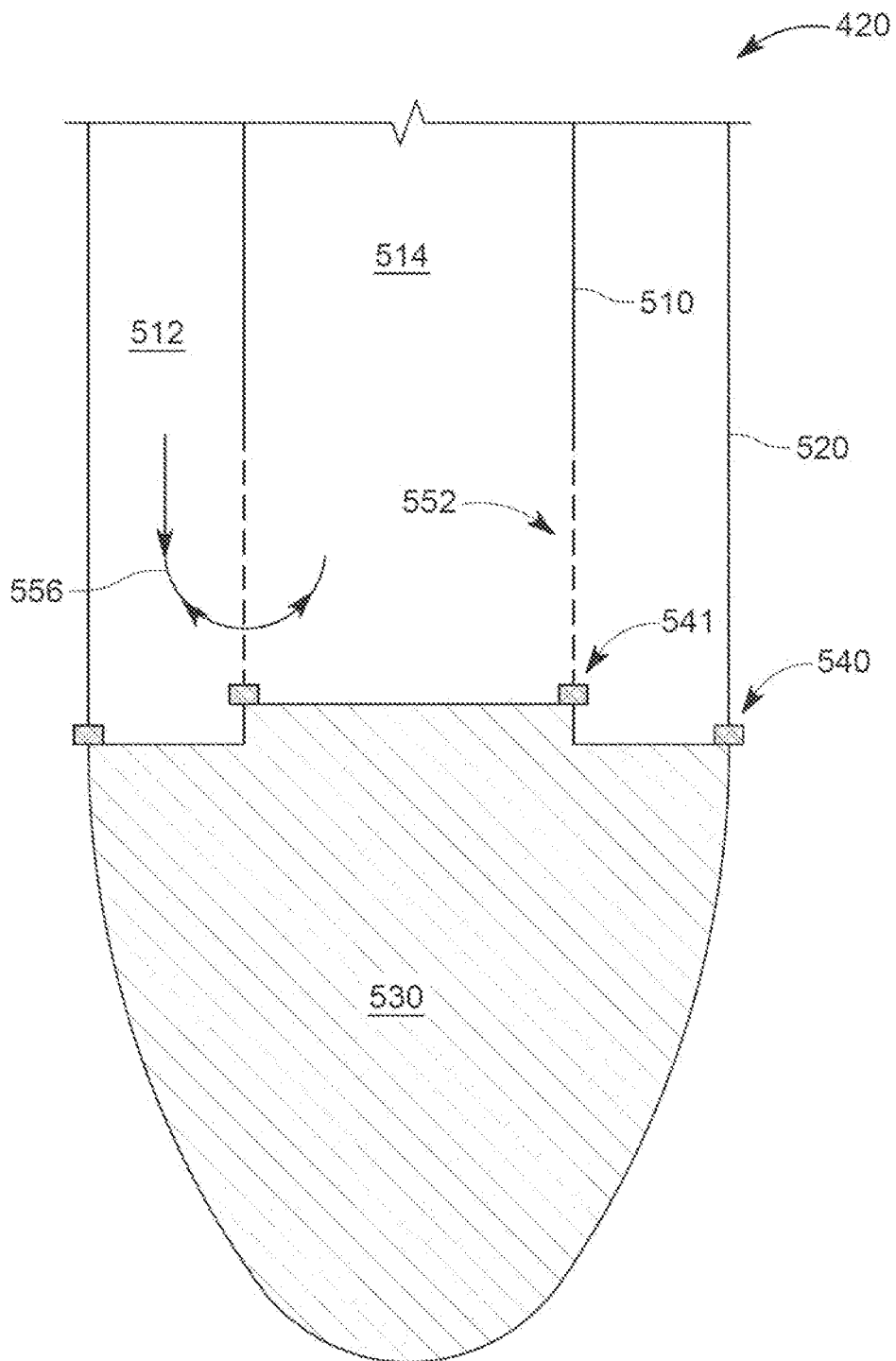


FIG. 7

[Fig. 8]

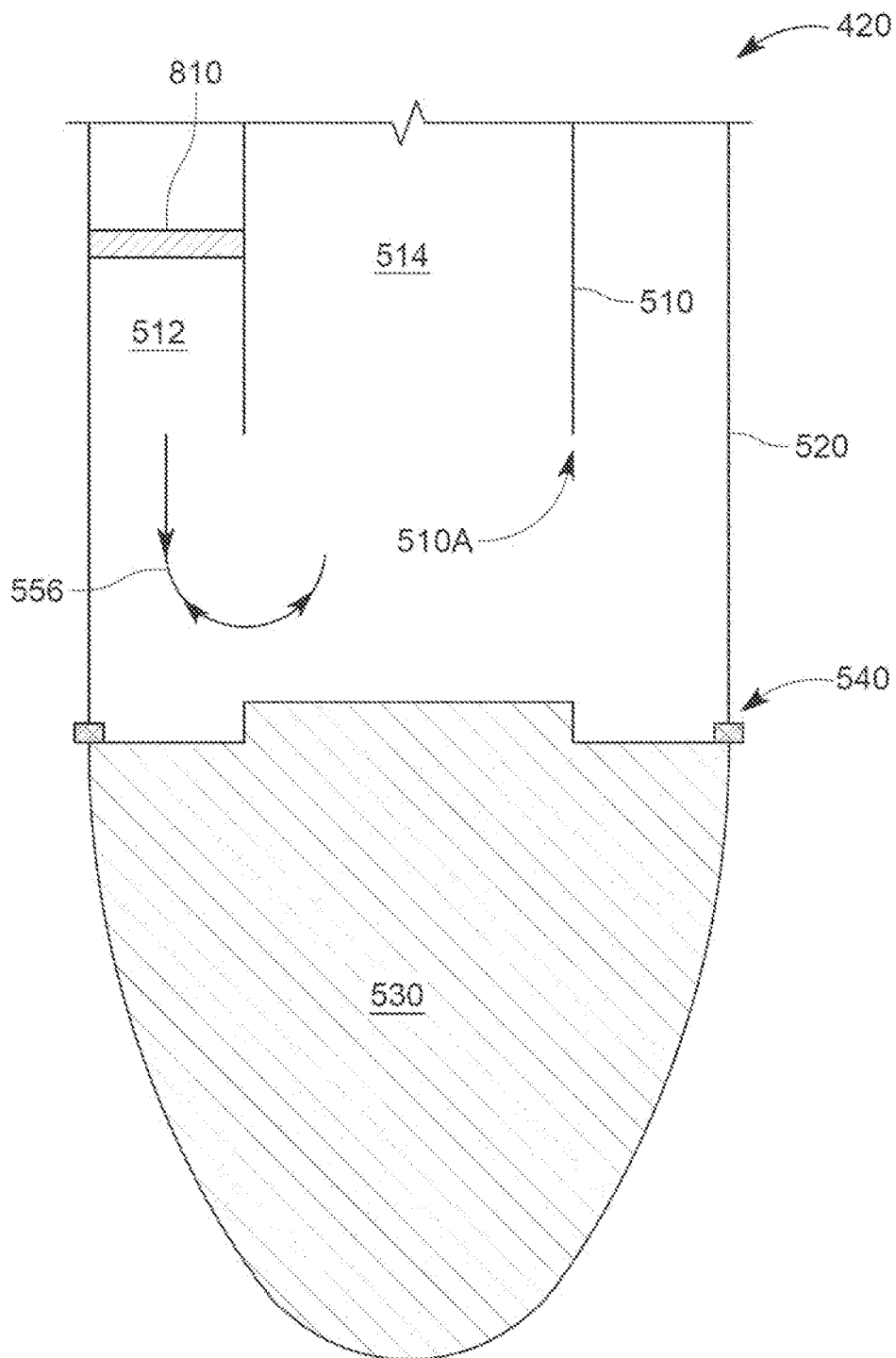


FIG. 8

[Fig. 9]

12/20

[Fig. 9]

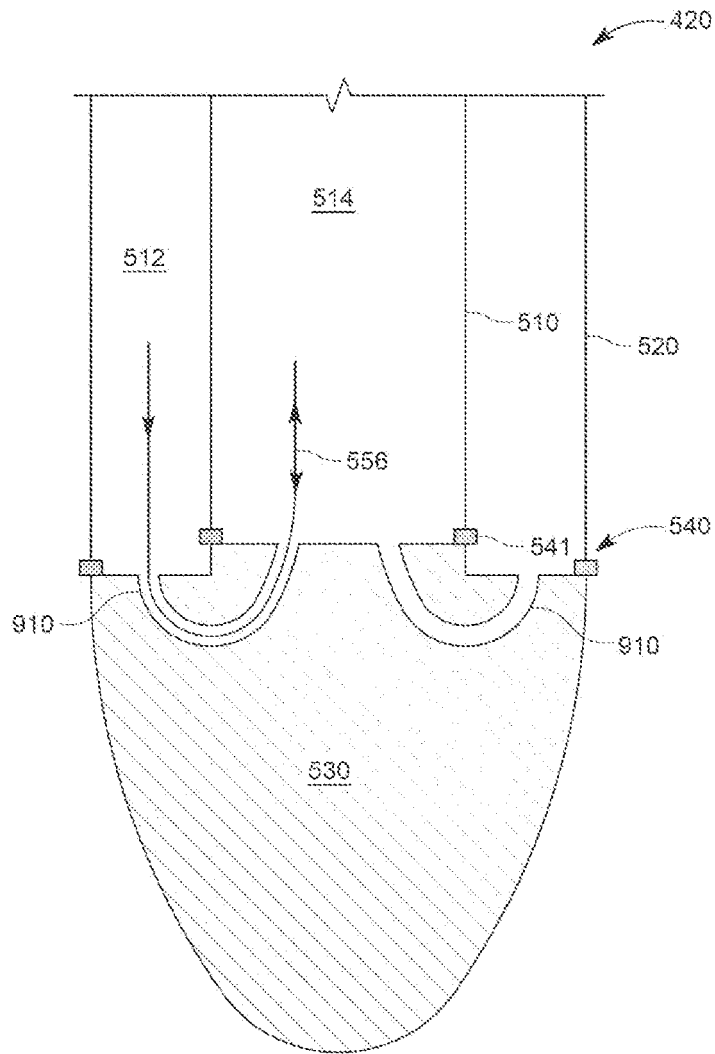


FIG. 9

[Fig. 10A]

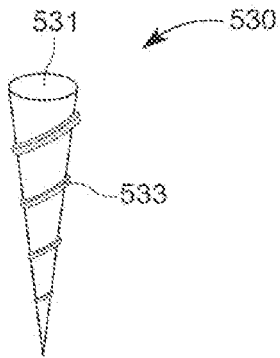


FIG. 10A

[Fig. 10B]

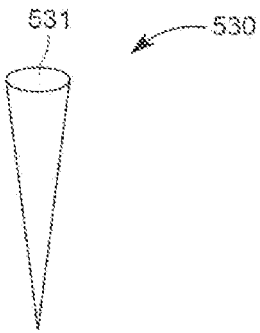


FIG. 10B

[Fig. 10C]

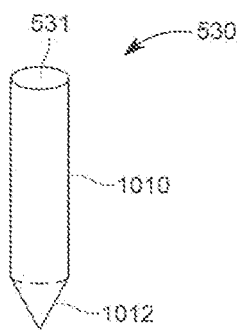


FIG. 10C

[Fig. 11A]

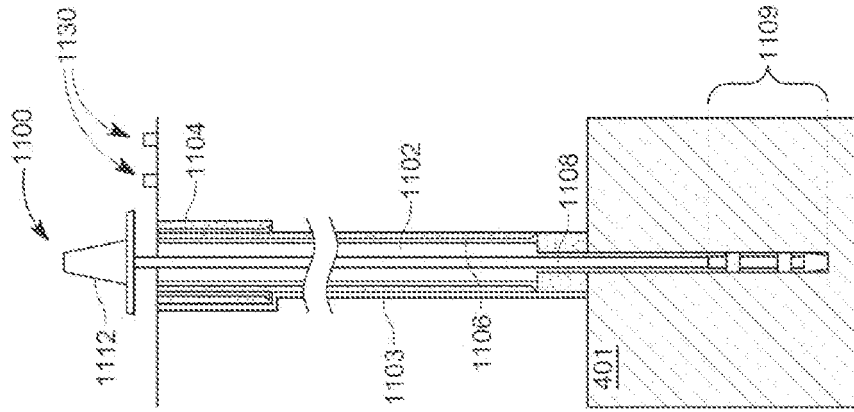


FIG. 11A

[Fig. 11B]

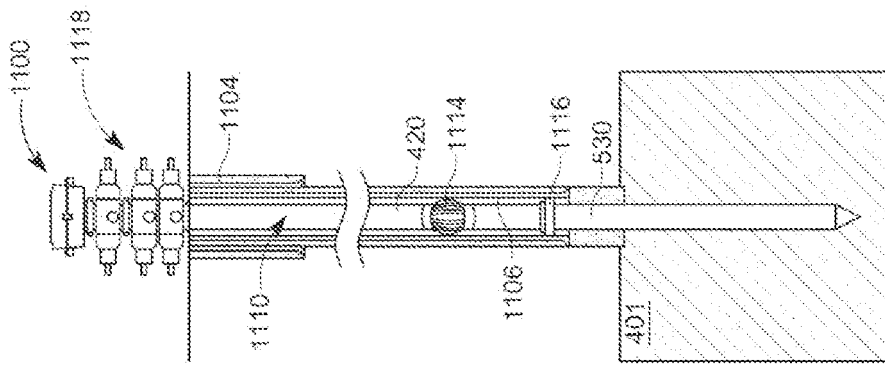


FIG. 11B

[Fig. 11C]

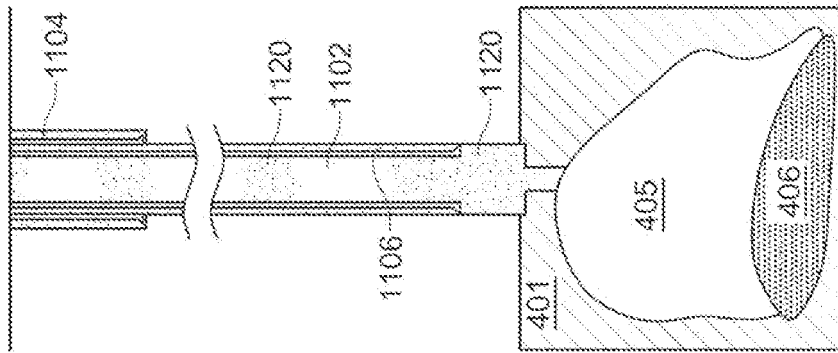


FIG. 11C

[Fig. 12]

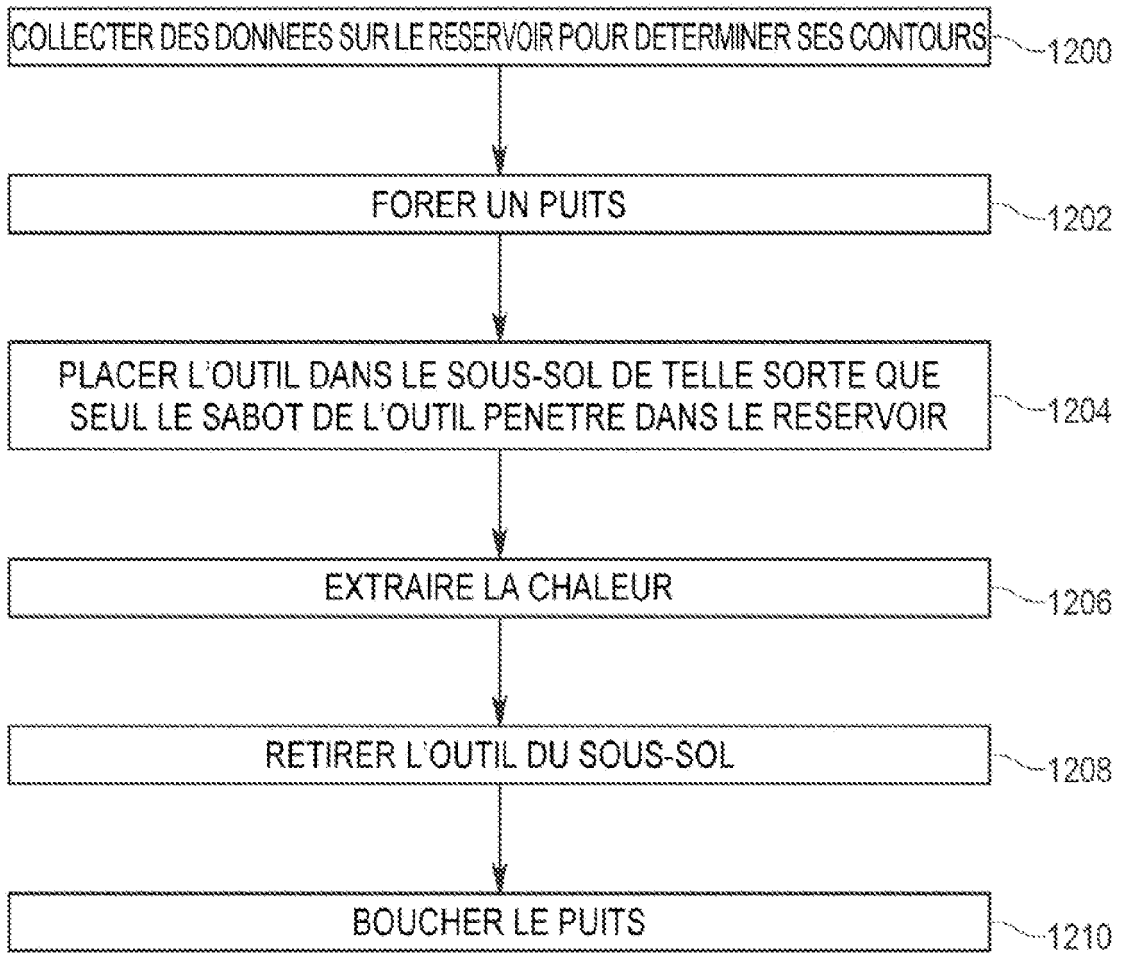


FIG. 12

[Fig. 13]

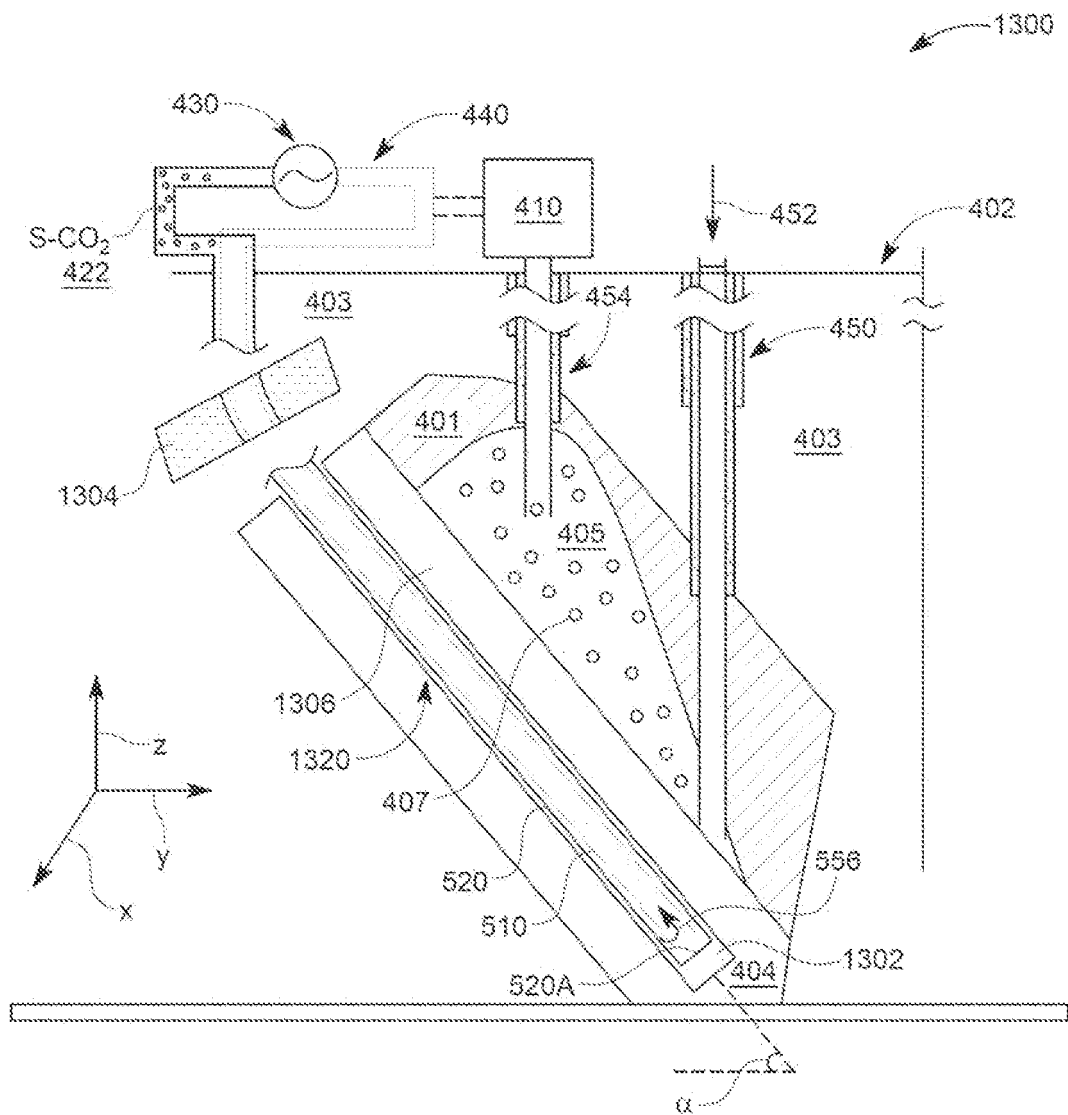


FIG. 13

[Fig. 14]

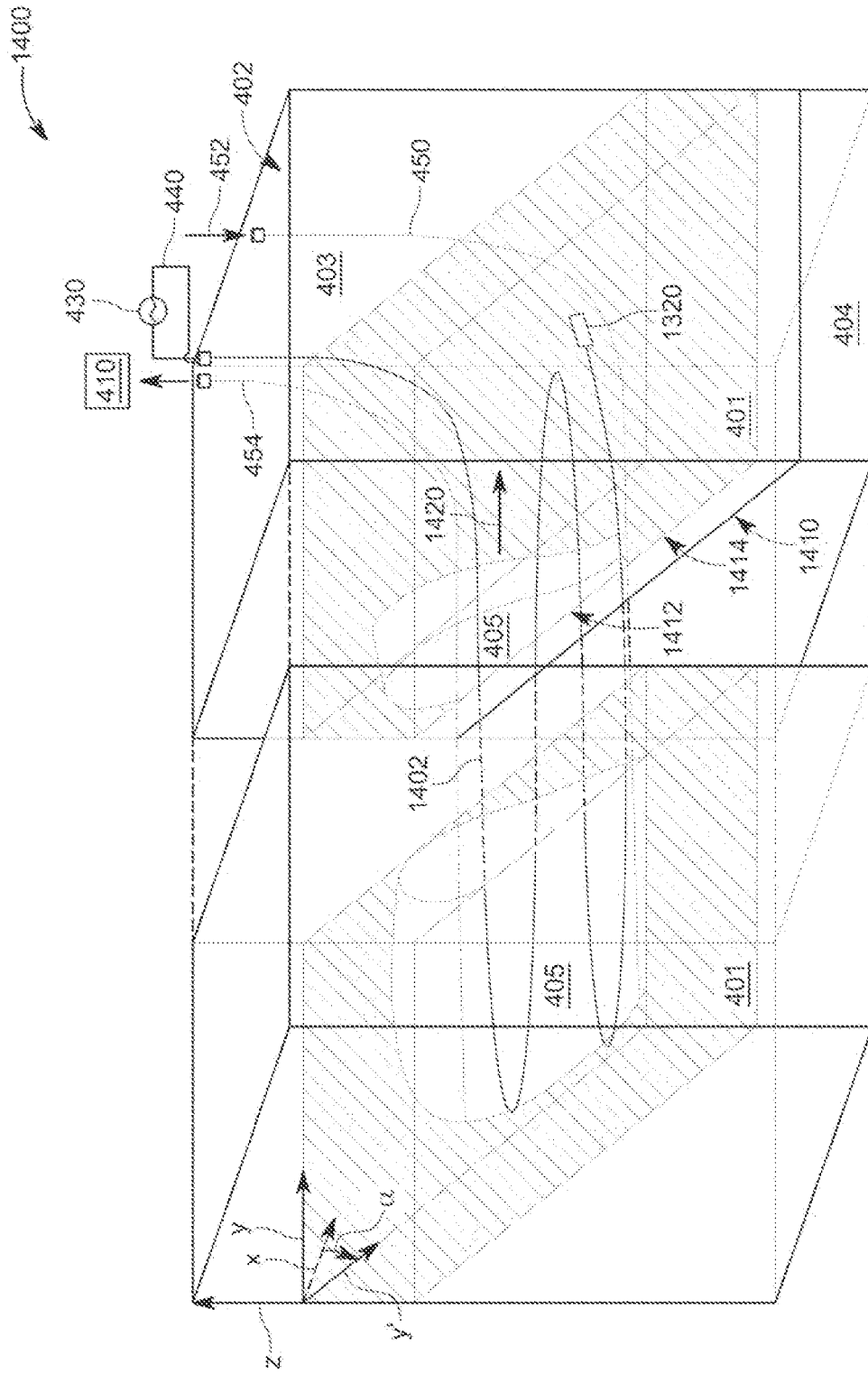


FIG. 14

[Fig. 15]

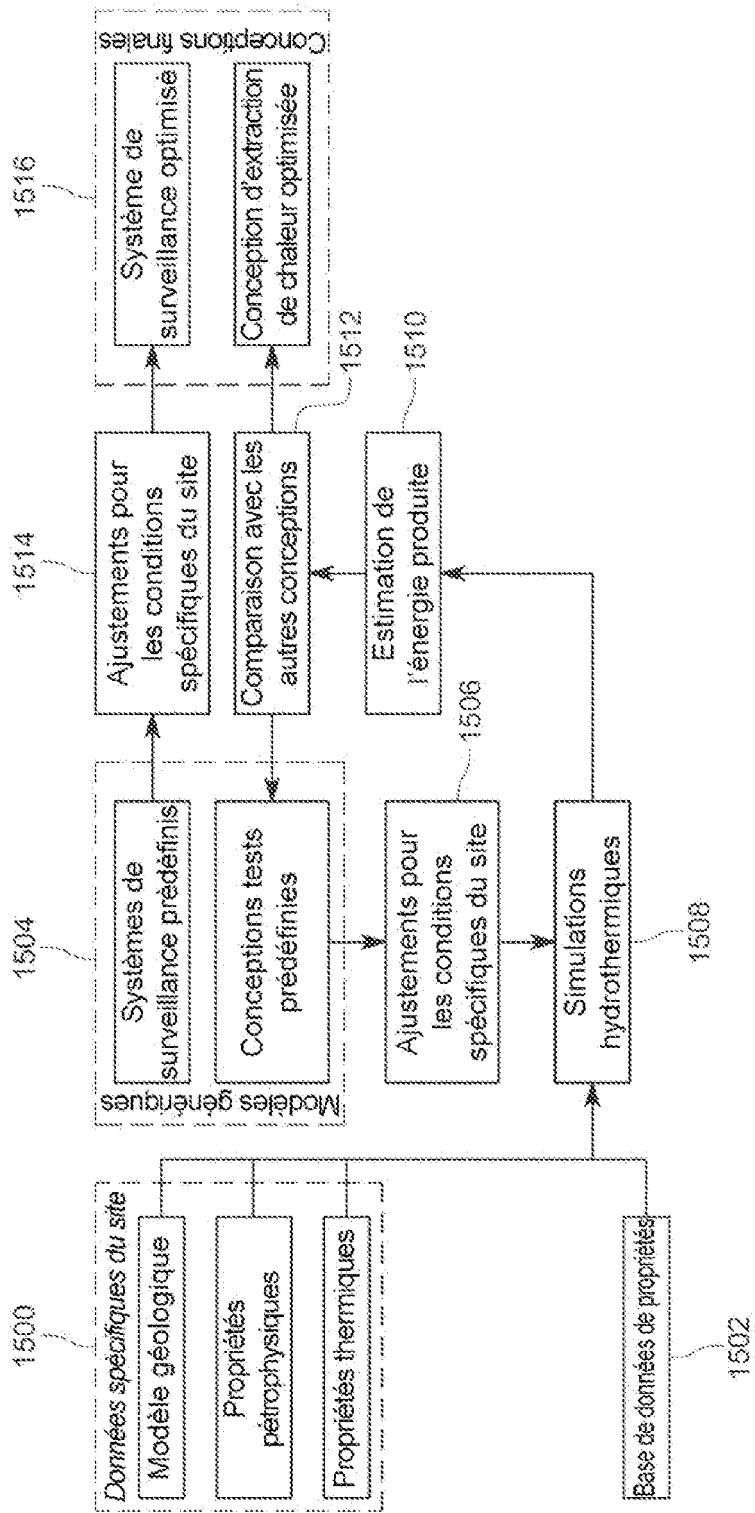


FIG. 15

[Fig. 16]

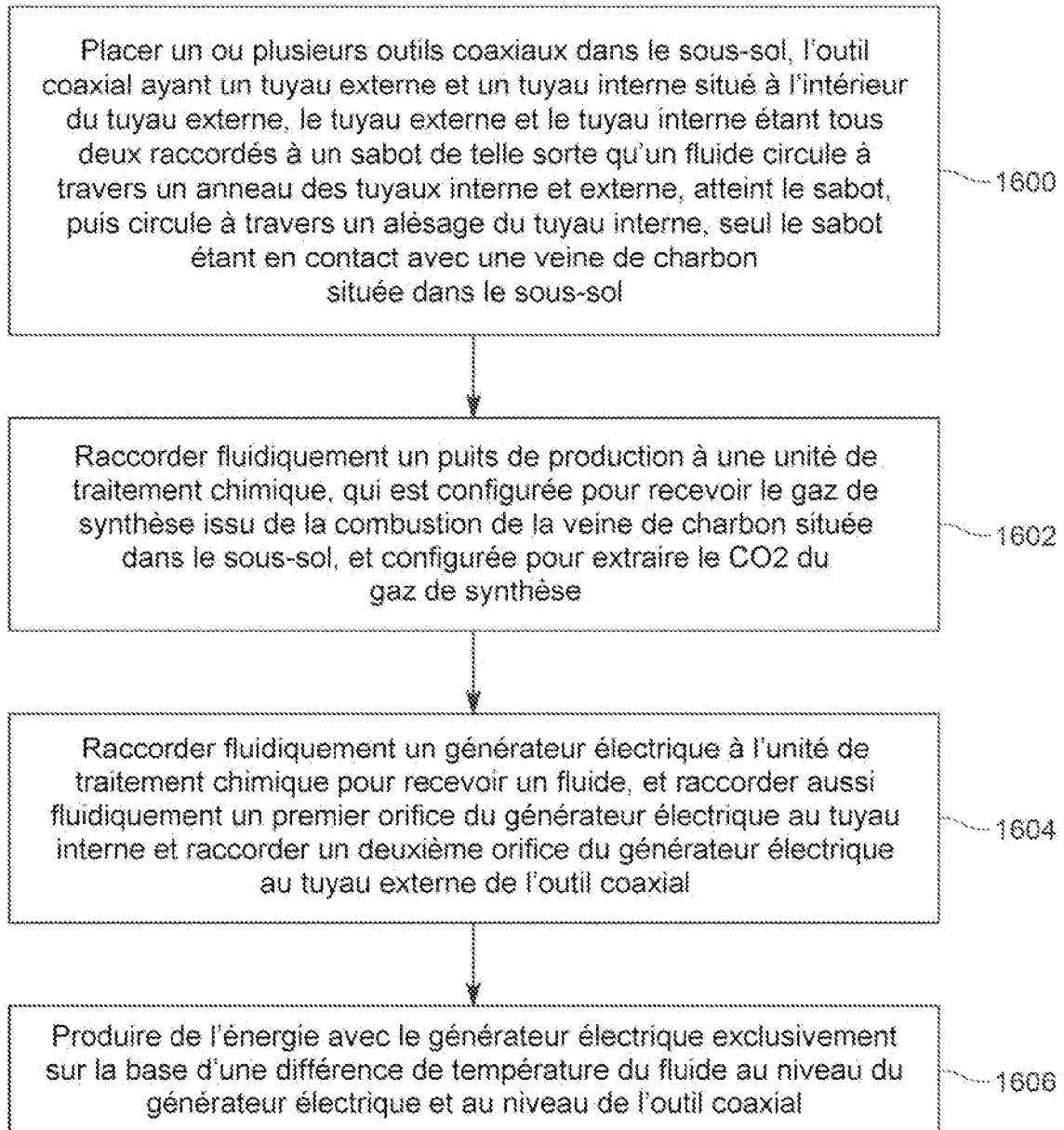


FIG. 16

[Fig. 17]

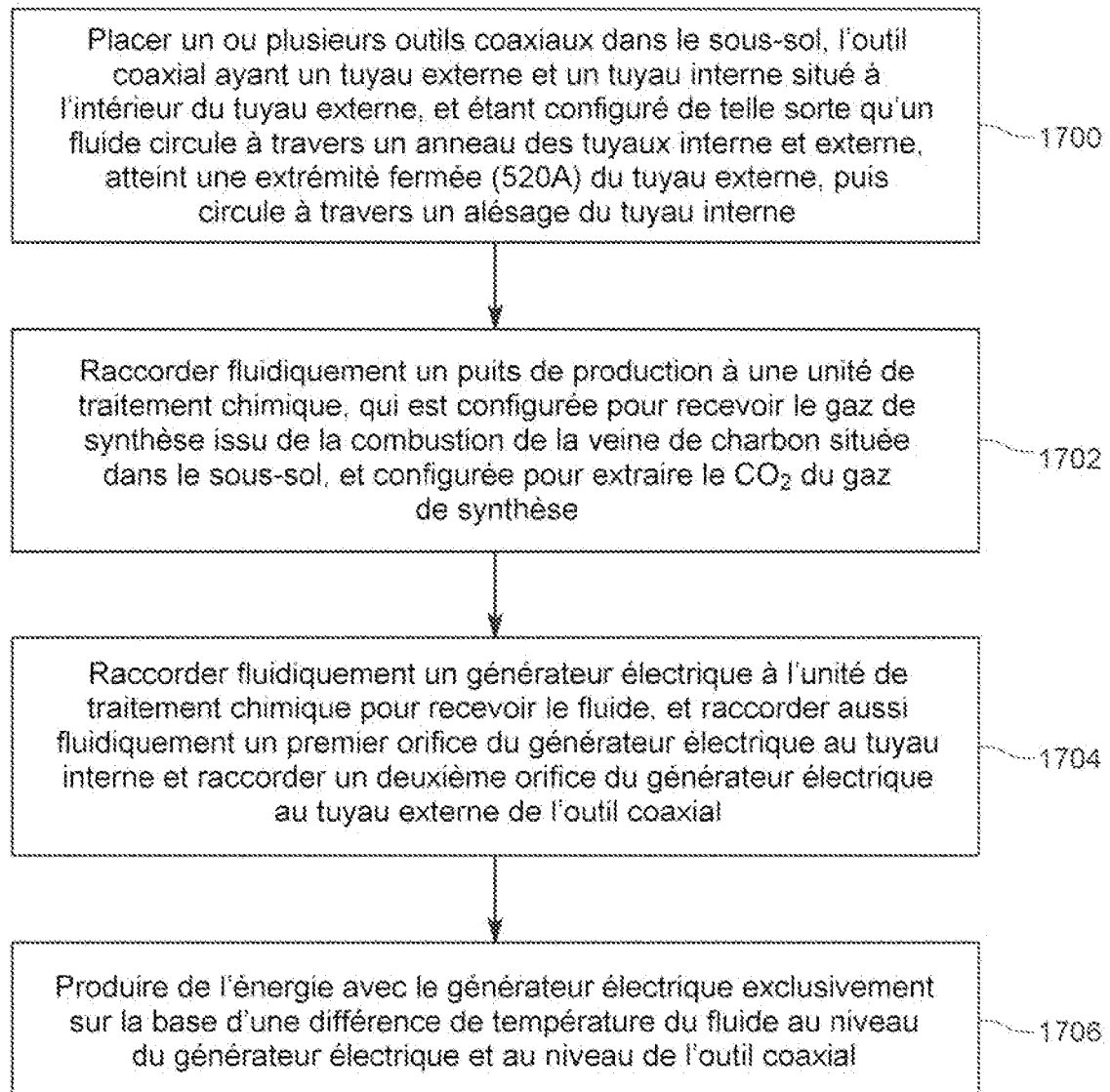


FIG. 17