

(19)



(11)

EP 4 325 158 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
21.02.2024 Bulletin 2024/08

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
F28D 15/04 ^(2006.01) **F28D 15/02** ^(2006.01)
F28F 3/08 ^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **23191678.4**

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
F28D 15/04; F28D 15/0233; F28F 3/086

(22) Date de dépôt: **16.08.2023**

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL
NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Etats d'extension désignés:
BA
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(72) Inventeurs:
• **MARIOTTO, Mathieu**
38054 GRENOBLE (FR)
• **CHAMPEL, Bénédicte**
38054 GRENOBLE (FR)
• **GRUSS, Jean-Antoine**
38170 SEYSSINET (FR)

(30) Priorité: **17.08.2022 FR 2208351**

(74) Mandataire: **Cabinet Nony**
11 rue Saint-Georges
75009 Paris (FR)

(71) Demandeur: **Commissariat à l'énergie atomique
et aux énergies alternatives**
75015 Paris (FR)

(54) **CALODUC DE TYPE À POMPAGE CAPILLAIRE, À RAINURES RÉENTRANTES
TRANSVERSALES À L'AXE LONGITUDINAL DU CALODUC**

(57) Caloduc de type à pompage capillaire, à rainures réentrantes transversales à l'axe longitudinal du caloduc.

L'invention concerne un caloduc (1) dont au moins

l'évaporateur comprend des canaux de liaison entre canal vapeur et canal(ux) liquide(s) qui sont non pas réalisés selon la longueur du caloduc comme selon l'état de l'art, mais transversalement à cette longueur.

[Fig 6]

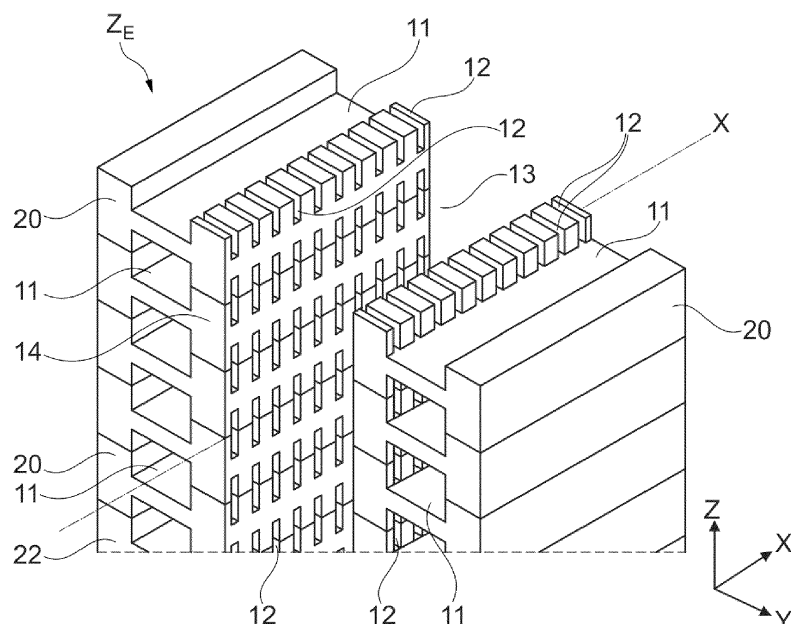


Fig. 6

EP 4 325 158 A1

Description**Domaine technique**

- 5 **[0001]** La présente invention concerne un caloduc de type à pompage capillaire à rainures réentrantes.
[0002] La présente invention vise à améliorer la limite d'ébullition d'un tel caloduc.

Technique antérieure

- 10 **[0003]** Un caloduc est un dispositif thermique permettant de transférer une quantité d'énergie depuis une source chaude vers une source froide, distantes d'une certaine longueur.
- 15 **[0004]** Un caloduc comporte une enceinte hermétiquement close, un fluide de travail et un réseau capillaire. Lors de la fabrication, tout l'air présent dans le tube caloduc est évacué et on introduit une quantité de liquide pur permettant de saturer le réseau capillaire. Une fois l'enceinte close, et soumis à une source chaude, il y a établissement d'un
- 20 **[0005]** Sous l'effet d'une source chaude appliquée dans une zone à l'une des extrémités longitudinales, désignée évaporateur, une partie de la phase liquide se vaporise et absorbe le flux thermique sous forme latente en induisant une légère surpression qui provoque le mouvement de la vapeur vers une zone à l'autre extrémité longitudinale, désignée condenseur où la source froide s'applique. Au condenseur, la vapeur se condense et repasse en phase liquide. Le fluide
- 25 condensé (les condensats) circule dans le réseau capillaire et revient vers l'évaporateur pour refaire un cycle, sous l'effet de forces capillaires, lorsque le caloduc n'est pas soumis à la gravité. Le retour du fluide liquide du condenseur à l'évaporateur est obtenu par pompage capillaire.
- 30 **[0006]** En effet, en l'absence de gravité, le moteur du caloduc est le pompage capillaire du fluide qui s'opère au niveau des zones d'interface liquide-vapeur spécifiquement configurées pour qu'un ménisque se forme, résultant de l'angle de contact entre le fluide et le métal constituant le caloduc (lui-même dépendant de la tension superficielle du fluide, et des tensions interfaciales solide/liquide et solide/vapeur). Plus les forces de pompage capillaire sont grandes par rapport aux diverses forces de frottement des phases du fluide avec les parois et entre elles, plus le caloduc est performant et peut transporter une grande quantité d'énergie. Les caloducs concernés par cette absence de gravité sont par exemple ceux mis en oeuvre dans des conditions de fonctionnement spatiales, comme pour la thermalisation de système de
- 35 **[0007]** En régime terrestre, avec la gravité, la problématique du retour de phase liquide est tout autre, et d'autres configurations d'interface liquide-vapeur/paroi sont mises en oeuvre.
- 40 **[0008]** Les caloducs à rainures fonctionnent sur le principe du pompage capillaire. Ils comportent un tube, dans lequel la surface intérieure comporte des rainures axiales/longitudinales [1] ou légèrement en forme de spirale. Les caloducs à rainures comportent un coeur vapeur et un réseau capillaire dans lequel circule la phase liquide. Du fait d'une variation de courbure de l'interface liquide-vapeur- entre la zone condenseur et la zone évaporateur, un gradient de pression apparaît dans le liquide, qui mène à une variation de pression capillaire. Plus la largeur des rainures est petite, plus l'effet de pompage capillaire est important.
- 45 **[0009]** Par ailleurs, des rainures profondes permettent d'obtenir une section de passage pour le retour liquide grande, et donc de minimiser la perte de pression.
- 50 **[0010]** La puissance maximale que peuvent transporter des caloducs à rainures est généralement fixée par la limite capillaire dont le terme moteur est la pression capillaire, et le terme limitant essentiellement la perte de pression liquide dans les rainures et, dans une moindre mesure les pertes de charge de l'écoulement vapeur.
- 55 **[0011]** Les caloducs à rainures réentrantes sont des exemples particuliers de caloducs à rainures, dans lesquels les rainures présentent un canal de liaison étroit par rapport au reste de la rainure, ce qui permet d'augmenter l'effet de pompage capillaire tout en limitant les pertes de charge. Ces caloducs sont utilisés principalement dans le domaine spatial, par exemple pour la régulation thermique dans les satellites et/ou les engins spatiaux.
- 60 **[0012]** Les techniques de réalisation connues des caloducs à rainures, et notamment des caloducs à rainures réentrantes, ne permettent pas d'obtenir des rainures ayant une profondeur sensiblement plus grande que leur largeur.
- 65 **[0013]** Ces caloducs sont réalisés essentiellement par extrusion. Avec une telle technique, le rapport profondeur sur largeur de rainures rectangulaires est de l'ordre de 1.
- 70 **[0014]** Dans le cas des rainures réentrantes, les contraintes de fabrication sont encore plus draconiennes, limitant la largeur, la longueur du rétrécissement et la section de la partie réentrante.
- 75 **[0015]** Une autre technique utilise l'usinage mécanique, avec cette technique également le rapport profondeur sur largeur n'est pas sensiblement supérieur à 1. En outre, cette technique a un prix de revient relativement élevé et n'est pas adaptée à la fabrication en moyenne et grande série.
- 80 **[0016]** Une autre technique utilise la gravure chimique. Mais elle ne permet pas non plus d'avoir un rapport profondeur sur largeur important.

[0017] Pour pallier ces inconvénients, la demanderesse a proposé dans la demande de brevet EP3553445A1 un caloduc réalisé par empilement de plaques solidarisées entre elles avec étanchéité, dont les plaques d'extrémité formant des plaques de fermeture et les plaques intercalaires sont structurées, de sorte que leur empilement délimite des rainures réentrantes s'étendant sur toute la longueur du caloduc. Les plaques peuvent être assemblées par différentes techniques

de soudure, brasure ou collage.

[0018] Le brevet US7051793 décrit un caloduc comportant une ou plusieurs zones de circulation du fluide sous forme vapeur et de part et d'autre de ces zones des zones poreuses de circulation du liquide, ces zones capillaires s'étendant sur tout le caloduc. Le caloduc est réalisé également par empilement de plaques. Les zones capillaires sont obtenues en empilant des plaques comportant des fenêtres, les fenêtres ayant des directions orthogonales d'une plaque à l'autre. L'effet de pompage capillaire n'est pas optimal. En outre, une importante perte de charge existe. Ce caloduc étale le flux thermique sur la largeur du caloduc et n'est pas optimisé pour le transport du flux de chaleur sur sa longueur.

[0019] Sur la plage de températures de fonctionnement d'un caloduc, différentes limites physiques peuvent limiter ses performances. La courbe de fonctionnement du caloduc, qui permet de connaître sa capacité de transport maximum, est obtenue par la réunion des courbes correspondant aux différentes limites physiques de fonctionnement qui définissent au final le domaine de fonctionnement du caloduc en termes de puissance maximale qu'il peut transférer.

[0020] La figure 1 illustre la courbe délimitant le domaine de fonctionnement pour un exemple de caloduc à pompage capillaire. Sur cette figure 1, on rappelle que les portions de courbe Qvisqueuse, Qsonique, Qentraînement, Qcapillaire, Qébullition, définissent respectivement les limites visqueuse, sonique, d'entraînement, capillaire et d'ébullition.

[0021] En ce qui concerne la limite d'ébullition, dans un caloduc à pompage capillaire, la pression motrice capillaire doit compenser les pertes de charge statiques liées aux forces de volume et dynamiques générées par l'écoulement du fluide de travail du caloduc (frottements entre les écoulements et les parois). Cette pression motrice capillaire, qui correspond à la différence de pression capillaire entre l'évaporateur et le condenseur, est fonction de la structure du caloduc, et les pertes de charge dynamiques sont croissantes avec le débit massique du fluide de travail (et avec la longueur du caloduc) : la limite capillaire est atteinte lorsque la pression motrice capillaire est égale à la somme des pertes de charges. Autrement dit, un caloduc ne fonctionne que si la pression motrice capillaire est supérieure, en conditions de microgravité, aux pertes de charge, et donc en dessous de la limite capillaire.

[0022] Cette limite s'exprime généralement en W.m : elle est inversement proportionnelle à la longueur efficace du caloduc, c'est-à-dire que pour un même design (même section transversale sur toute la longueur), la limite capillaire, exprimée en W, d'un caloduc de 2 mètres est la moitié de celle d'un caloduc de 1 mètre.

[0023] Les pertes de charge par frottement dans un écoulement s'expriment par l'équation de Darcy-Weisbach comme suit :

[Equation 1]

$$\frac{dP}{dz} = f \frac{1}{D_h} \rho \frac{v^2}{2}$$

dans laquelle :

f est le coefficient de perte de charge (dépendant du régime d'écoulement du fluide, et que l'on peut déterminer via le nombre de Reynolds à partir de corrélations),

v la vitesse du fluide de travail (proportionnelle à la puissance thermique à transporter),

ρ la masse volumique du fluide de travail et

D_h le diamètre hydraulique.

[0024] Le diamètre hydraulique est lui-même défini par l'équation suivante:

[Equation 2]

$$D_h = \frac{4S}{P_m}$$

avec S la section du fluide et P_m le périmètre mouillé.

[0025] On comprend donc que pour maximiser la limite capillaire, il faut privilégier des canaux de liquide et de vapeur de section élevée, afin de minimiser les vitesses de fluides dans ces canaux sans réduire le débit, qui est proportionnel à la puissance thermique transférée dans le caloduc.

[0026] Il est également nécessaire d'avoir une largeur de rainure à l'interface faible, afin d'avoir une pression capillaire élevée. Mais cette largeur de rainure ne peut être trop faible pour être réalisable technologiquement par une opération de brasure selon le procédé de la demande EP3553445A1. En effet, une largeur trop faible induirait un risque de bouchage par la brasure.

[0027] Par ailleurs, le rapport des sections entre le canal et la rainure ne doit pas être trop élevé, afin de faciliter l'évacuation des bulles de vapeur pouvant éventuellement apparaître dans les canaux.

[0028] Par ailleurs également, lors de l'évaporation du ménisque de l'interface liquide/vapeur dans la rainure qui délimite un canal de liaison, le ménisque recule dans cette dernière, d'autant plus que le flux thermique est élevé. Si le ménisque recule trop, il peut atteindre le canal réentrant. Dans ce cas, le rayon capillaire à l'interface augmente et donc la pression capillaire, moteur du caloduc diminue; il y a alors risque de désamorçage du caloduc.

[0029] Il est donc avantageux d'avoir un volume important de liquide dans un canal de liaison, afin de minimiser ce phénomène.

[0030] La résistance thermique globale d'un caloduc peut être évaluée en faisant une analogie de réseau de résistances thermiques indépendantes.

[0031] Un tel réseau est schématisé en figure 2 dans laquelle un flux de chaleur Q émis par une source chaude SC doit être évacué par un caloduc jusqu'à une source froide.

[0032] D'un point de vue thermique, le caloduc peut être considéré comme un ensemble d'un nombre de onze résistances thermiques R1 à R11 en série et/ou en parallèle comme représenté sur cette figure 1. Les résistances axiales de la paroi extérieure R10 et du réseau capillaire R11 sur la longueur du caloduc sont immenses. Par conséquent, le chemin du flux thermique privilégié est celui passant par la section de circulation de la vapeur. Ce chemin est constitué de cinq résistances différentes, comme suit :

- la résistance entre la source extérieure et la paroi R1, R9 respectivement à l'évaporateur et au condenseur;
- la résistance de la paroi extérieure R2, R8 respectivement à l'évaporateur et au condenseur;
- la résistance des canaux liquides (réseau capillaire) R3, R7 respectivement à l'évaporateur et au condenseur ;
- la résistance de l'interface entre liquide et vapeur R4, R6 respectivement à l'évaporateur et au condenseur et
- la résistance de l'écoulement de vapeur R5.

[0033] Sur ce chemin, la résistance thermique limitante est celle des canaux liquides (réseau capillaire), respectivement à l'évaporateur et au condenseur (R3, R7).

[0034] Pour l'évaporateur, l'auteur de la publication [2] a proposé un modèle de résistance thermique avec un chemin à travers le liquide dans la rainure en parallèle d'un chemin conductif dans la dent puis dans le film d'évaporation.

[0035] Dans ce modèle très conservatif, la conductivité équivalente du film est donnée par une formule empirique selon l'équation 3 :

[Equation 3]

$$\lambda_{\text{film}} = \frac{\lambda_l}{0.185 * c}$$

[0036] Dans un caloduc à parois en aluminium et rempli d'ammoniac en tant que fluide de travail, étant donné l'écart de conductivité thermique entre l'ammoniac liquide (0,4 W/m/K) et l'aluminium (150 W/m/K), le chemin privilégié du flux thermique entre la source chaude et la vapeur va passer par les parois métalliques entre canaux liquides.

[0037] Le même schéma se produit au condenseur, où le chemin privilégié du flux thermique entre la vapeur et la source froide va passer par les parois entre canaux.

[0038] Il ressort donc que, pour augmenter la conductance thermique à l'évaporateur et au condenseur, il est avantageux que les parois entre canaux liquides aient une section la plus élevée possible.

[0039] Enfin, la résistance de film dépend notamment de la longueur des lignes triples de contact entre liquide, vapeur et solide.

[0040] La résistance mécanique d'un caloduc à rainures réentrantes peut également aussi impacter ses performances. En particulier, dans la demande de brevet EP3553445A1, un canal de liaison entre un canal liquide et un canal vapeur est complètement ouvert sur toute sa longueur selon l'axe longitudinal du caloduc, l'assemblage brasé, collé ou soudé des plaques empilées ne peut donc être réalisé que sur les parois périphériques de celles-ci, ce qui entraîne des

épaisseurs de paroi importantes pour résister à la pression interne du caloduc.

[0041] Par conséquent, dans les caloducs à rainures réentrantes selon l'état de l'art, les canaux de liaison entre les rainures réentrantes (canaux) remplis de liquide et le canal vapeur sont réalisées sur toute la longueur selon l'axe longitudinal du caloduc, ce qui entraîne les inconvénients suivants :

- limitation de la résistance thermique à l'évaporateur par conduction thermique limitée dans les parois entre canaux ;
- limitation de la résistance thermique à l'évaporateur par limitation des longueurs de lignes triples de contact entre liquide, vapeur et solide, lieu privilégié d'évaporation du liquide ;
- limitation du flux thermique pouvant être transporté par le caloduc, par volume limité des canaux de liaison entraînant un risque de reculée du ménisque dans les canaux réentrants de liquide et par-là un désamorçage du caloduc. Une augmentation de la longueur des canaux de liaison permettrait d'éviter ce risque, mais au détriment du volume et de la masse du caloduc ;
- brasage, collage ou soudage des plaques empilées, entre elles uniquement dans les parois longitudinales périphériques du caloduc.

[0042] Par conséquent, il existe un besoin pour améliorer encore les caloducs à rainures réentrantes, et ce afin de pallier les inconvénients précités.

[0043] Le but général de l'invention est alors de répondre au moins en partie à ce besoin.

Exposé de l'invention

[0044] Pour ce faire, l'invention a tout d'abord pour objet un caloduc à pompage capillaire à rainures réentrantes, s'étendant le long d'une première direction longitudinale (X), comprenant une enceinte étanche s'étendant entre une première extrémité longitudinale, destinée à être chauffée par une source chaude SC pour former, au sein de l'enceinte, un évaporateur et une deuxième extrémité longitudinale destinée à être refroidie par une source froide SF pour former, au sein de l'enceinte, un condenseur, l'enceinte étanche délimitant une zone adiabatique entre l'évaporateur et le condenseur, l'enceinte étanche comprenant un empilement de plaques selon une deuxième direction, orthogonale à la première direction, dont deux plaques de fermeture et au moins un nombre de n modules les uns sur les autres avec n étant un entier supérieur ou égal à 1, chaque module comprenant au moins une plaque intercalaire entre les plaques de fermeture, la ou les plaques intercalaires comprenant au moins une première plaque intercalaire comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie un canal vapeur s'étendant le long de la première direction (X) entre l'évaporateur et le condenseur, dans lequel la vapeur est destinée à circuler, et sur au moins un côté latéral de la fenêtre selon une troisième direction (Y) orthogonale aux première (X) et deuxième direction (Z), au moins une structuration dont les bords délimitent en partie au moins un canal liquide dans l'évaporateur et le condenseur, le caloduc comprenant, au moins dans l'évaporateur, au moins une zone d'échange définissant une interface liquide-vapeur et délimitée entre la au moins une plaque intercalaire et au moins une autre plaque intercalaire ou une plaque de fermeture, reliant le canal vapeur et le(s) canal(ux) liquide(s).

[0045] Selon l'invention, chaque zone d'échange comprenant une pluralité de canaux de liaison, débouchants qui s'étendent transversalement à la première direction (X), de préférence selon la troisième direction (Y), deux canaux de liaison adjacents étant séparés par une épaisseur de structuration.

[0046] La largeur des canaux de liaison est de préférence comprise entre 0,1 mm et 0,5mm, et de manière optimale égale à 0,2mm.

[0047] Une épaisseur de structuration est de préférence comprise entre 0,3 mm et 3mm et de manière optimale égale à 1mm.

[0048] Plus le nombre de canaux de liaison est important, plus le nombre de lignes triples d'interface liquide vapeur est également élevé, ce qui permet d'obtenir une meilleure conductance locale à l'évaporateur, croisé avec des limites estimées de fabricabilité (par usinage ou fabrication additive).

[0049] Selon une configuration avantageuse, le condenseur du caloduc comprend également au moins une zone d'échange définissant une interface liquide-vapeur et délimitée entre la au moins une plaque intercalaire et au moins une autre plaque intercalaire ou une plaque de fermeture, reliant le canal vapeur et le(s) canal(ux) liquide(s), chaque zone d'échange comprenant au moins un canal de liaison, débouchant qui s'étend transversalement à la première direction (X), de préférence selon la troisième direction (Y).

[0050] Avantageusement, la section transversale dans le plan XZ de chaque canal de liaison débouchant dans le condenseur est supérieure à celle dans l'évaporateur. En effet, les canaux de liaison peuvent être plus larges dans le condenseur car il n'y a pas besoin de pression capillaire contrairement à l'évaporateur.

[0051] Avantageusement encore, la zone adiabatique du caloduc est exempte de zone d'échange entre le canal vapeur et le(s) canal(ux) liquide(s).

[0052] Le matériau constitutif des plaques formant l'enceinte étanche est de préférence choisi parmi l'aluminium, le

EP 4 325 158 A1

cuivre, le nickel, ou un alliage à base d'au moins deux de ceux-ci.

[0053] Selon une ou plusieurs caractéristiques avantageuses qui peuvent être combinées entre elles :

- les plaques intercalaires présentent une épaisseur comprise entre 0,5 à 6mm, de préférence de l'ordre de 2mm,
- les plaques de fermeture présentent une épaisseur comprise entre 1 et 3mm, de préférence de l'ordre de 2mm,
- la largeur dans le plan XZ d'un canal de liaison est comprise entre 0,1 et 1mm, de préférence de l'ordre de 0,2mm,
- l'épaisseur de structuration dans le plan XZ délimitant l'espace entre deux canaux de liaison adjacents est comprise entre 0,2 et 2mm, de préférence de l'ordre de 0,4mm,
- la largeur dans le plan YZ d'un canal liquide est comprise entre 0,5 et 4mm, de préférence de l'ordre de 3mm.

[0054] Selon une variante de réalisation avantageuse, chaque canal de liaison est réalisé débouchant sur toute l'épaisseur dans le plan YZ d'une structuration d'une plaque intercalaire.

[0055] Cette variante amène plusieurs avantages :

- elle facilite l'usinage des canaux de liaison car ils sont réalisés en une seule opération sur chaque plaque,
- elle permet de faire communiquer partiellement les canaux ré entrants entre eux (d'un canal liquide à un autre), ce qui peut permettre d'équilibrer les écoulements dans ceux-ci, notamment s'il y a un écoulement diphasique,
- elle permet d'augmenter la part liquide dans un canal de liaison, ainsi que la longueur des lignes triples, ce qui améliore davantage la résistance thermique à l'évaporateur.

[0056] Selon une autre variante de réalisation avantageuse, les canaux de liaison sont réalisés de telle sorte à être agencés en quinconce dans un plan XZ.

[0057] Selon un mode de réalisation avantageux, les structururations comprennent des rainures longitudinales, non débouchantes, qui s'étendent selon la première direction (X), du côté du canal vapeur, en croisant les canaux de liaison. Ces rainures longitudinales non débouchantes permettent d'augmenter la surface de contact entre liquide et vapeur, et la longueur des lignes triples, permettant ainsi de diminuer la résistance thermique dans la zone d'évaporation.

[0058] Selon ce mode, la largeur dans le plan YZ des rainures longitudinales est de préférence sensiblement égale à la largeur dans le plan XZ des canaux de liaison.

[0059] La largeur dans le plan YZ des rainures longitudinales est de préférence sensiblement égale à leur profondeur selon la troisième direction (Y).

[0060] Selon un mode de réalisation avantageux, au moins une plaque intercalaire comprend des rainures longitudinales qui s'étendent selon la première direction, à l'interface avec une plaque intercalaire adjacente ou une plaque de fermeture, en croisant les canaux de liaison. Afin d'éviter de boucher les canaux de liaison avec de la brasure lors d'une opération de brasage pour l'assemblage entre les différentes plaques de l'empilement, ces rainures longitudinales sur les surfaces de brasage dans cette zone permettent de piéger la brasure en excès.

[0061] On peut disposer ces rainures sur un seul des côtés longitudinaux, ou sur les deux côtés d'une plaque intercalaire.

[0062] La largeur de ces rainures est avantageusement sensiblement égale ou légèrement plus faible à celle des canaux de liaison afin de favoriser par pompage capillaire le piégeage préférentiel de la brasure en excès dans ces zones.

[0063] Selon une configuration avantageuse, le caloduc comporte n modules les uns sur les autres, n étant un entier supérieur ou égal à 1, définissant un canal vapeur unique et n canaux liquides sur au moins un côté latéral, notamment sur chaque côté latéral du canal vapeur.

[0064] Avantageusement, la section transversale dans le plan YZ du canal vapeur et du(des) canal(ux) liquide(s), de préférence rectangulaire, est constante sur toute la longueur du caloduc.

[0065] L'invention a également pour objet un système comprenant :

- une source froide (SF) ;
- une source chaude (SC) et
- au moins un caloduc à rainures réentrantes tel que décrit précédemment, le caloduc étant agencé de sorte que le flux de chaleur (Φ_E) de la source chaude (SC) sur l'évaporateur étant sur au moins une face latérale de l'enceinte en regard du canal vapeur ou sur au moins une face latérale en regard du(des) canal(ux) liquide(s), tandis que l'extraction de chaleur au condenseur vers la source froide (SF) étant sur au moins une face latérale de l'enceinte en regard du(des) canal(ux) liquide(s), ou sur une face latérale perpendiculaire à celui-ci (ceux-ci).

[0066] Ainsi, l'invention consiste essentiellement à proposer un caloduc dont au moins l'évaporateur comprend des canaux de liaison entre canal vapeur et canal(ux) liquide(s) qui sont non pas réalisés selon la longueur du caloduc comme selon l'état de l'art, mais transversalement à cette longueur.

[0067] La réalisation d'un tel caloduc est mise en oeuvre avec un procédé comme selon la demande de brevet EP3553445, qui consiste à empiler puis assembler entre elles par collage, soudage, de préférence par brasage sous vide, des plaques métalliques poinçonnées ou usinées pour définir les différents canaux de caloduc.

[0068] L'invention apporte de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer ceux par rapport aux solutions selon l'état de l'art, notamment un caloduc selon EP3553445:

- une augmentation de la résistance à la pression du caloduc du fait d'une zone d'assemblage supplémentaire par les structurations entre les canaux des liaisons. Ceci permet de diminuer les épaisseurs périphériques dans la section du caloduc, et donc de diminuer la masse et le volume du caloduc,
- une amélioration de la résistance thermique du caloduc au niveau de l'évaporateur grâce à une plus grande longueur des lignes triples, sans perturber les lignes de flux thermique qui relient la zone où le flux à thermaliser est appliqué vers ces lignes triples. De plus, la résistance thermique de conduction au niveau d'un canal de liaison est améliorée,
- une augmentation de la surface de ménisque d'interface liquide/vapeur, tout en conservant une ouverture de canal de liaison la plus faible possible, qui assure la pression motrice assurant le pompage capillaire dans le caloduc,
- une augmentation du volume de liquide dans un canal de liaison entre canal liquide et canal vapeur, ce qui permet une reculée du ménisque qui est moindre, à flux thermique équivalent. Ceci implique une longueur de zone de liaison (canaux de liaison) nécessaire qui est moindre et donc un gain en volume et en masse supplémentaire. Ce gain peut aussi être utilisé, en gardant la même longueur de canal de liaison, pour obtenir une plage de température d'opérations plus large à taux de remplissage donné. Alternativement, en gardant la même longueur de canal de liaison, on peut obtenir une plage de température d'opérations plus large à taux de remplissage donné du caloduc.

[0069] D'autres avantages et caractéristiques ressortiront mieux à la lecture de la description détaillée, faite à titre illustratif et non limitatif, en référence aux figures suivantes.

Brève description des dessins

[0070]

[Fig 1] la figure 1 illustre la courbe délimitant le domaine de fonctionnement pour un exemple de caloduc à pompage capillaire.

[Fig 2] la figure 2 est une représentation symbolique d'un réseau de résistances thermiques qui s'établissent pour un caloduc.

[Fig 3] la figure 3 est une vue schématique de côté d'un caloduc à rainures réentrantes, selon l'état de l'art.

[Fig 4] la figure 4 est une vue en perspective et coupe transversale de la figure 3, au niveau de l'évaporateur du caloduc à rainures réentrantes selon la demande de brevet EP3553445.

[Fig 5] la figure 5 est une vue de détail et en coupe transversale de la figure 4.

[Fig 6] la figure 6 est une vue partielle en perspective et coupe transversale, au niveau de l'évaporateur d'un caloduc à rainures réentrantes à canaux de liaison transversaux réalisé par empilement de plaques métalliques assemblées selon l'invention.

[Fig 7] la figure 7 est une est une vue de détail et en coupe transversale de la figure 6.

[Fig 7A] la figure 7A est une vue de détail et en coupe longitudinale de la figure 7.

[Fig 8] la figure 8 est une vue en perspective d'une partie d'un évaporateur selon l'état de l'art, comme illustré à la figure 4.

[Fig 9] la figure 9 est une vue en perspective d'une partie d'un évaporateur selon l'invention, comme illustré à la figure 6.

[Fig 10] la figure 10 est une représentation graphique de calculs mécaniques réalisés au moyen d'un logiciel de simulation par éléments finis de la partie selon l'état de l'art illustrée à la figure 8.

[Fig 11] la figure 11 est une représentation graphique de calculs mécaniques réalisés au moyen d'un logiciel de simulation par éléments finis de la partie selon l'invention illustrée à la figure 9.

[Fig 12] la figure 12 illustre sous forme de courbes les gains respectivement sur le volume d'interface liquide-vapeur et de longueur de lignes triples, obtenus au niveau de l'évaporateur d'un caloduc grâce aux canaux de liaison transversaux conformes à l'invention.

[Fig 13] la figure 13 est une vue partielle en perspective et en coupe transversale d'un caloduc à rainures réentrantes selon l'invention selon une variante d'amenée du flux de chaleur provenant d'une source chaude.

[Fig 14] la figure 14 est une vue partielle en perspective et en coupe transversale d'un caloduc à rainures réentrantes selon l'invention selon une autre variante d'amenée du flux de chaleur provenant d'une source chaude.

[Fig 15] la figure 15 est une vue partielle en perspective et en coupe transversale d'un caloduc à rainures réentrantes selon l'invention selon une variante de réalisation où une seule face longitudinale des plaques intercalaires de l'empilement est usinée.

[Fig 16] la figure 16 est une vue partielle en perspective et en coupe transversale d'un caloduc à rainures réentrantes selon une variante de réalisation où les canaux de liaison transversaux selon l'invention sont réalisés sur toute l'épaisseur des plaques intercalaires de l'empilement.

[Fig 17] la figure 17 illustre sous forme de courbes les gains respectivement sur le volume d'interface liquide-vapeur et de longueur de lignes triples, obtenus au niveau de l'évaporateur d'un caloduc grâce aux canaux de liaison transversaux conformes à la variante de la figure 16.

[Fig 18] la figure 18 est une vue partielle en perspective et en coupe transversale d'un caloduc à rainures réentrantes selon une variante de réalisation où les canaux de liaison transversaux selon l'invention sont agencés en quinconce dans un plan longitudinal XZ du caloduc.

[Fig 19] la figure 19 est une vue partielle en perspective et en coupe transversale d'un caloduc à rainures réentrantes selon une variante de réalisation où des rainures longitudinales non débouchantes sont réalisées côté du canal vapeur en croisant les canaux de liaison transversaux selon l'invention.

[Fig 20] la figure 20 est une vue partielle en perspective et en coupe transversale d'un caloduc à rainures réentrantes selon une variante de réalisation où des rainures longitudinales non débouchantes sont réalisées à l'interface entre plaques de l'empilement en croisant les canaux de liaison transversaux selon l'invention.

Description détaillée

[0071] Les figures 1 et 2 ont déjà été commentées en préambule. Elles ne sont pas détaillées ci-après.

[0072] Par souci de clarté, un même élément selon l'art antérieur et l'invention est désigné par la même référence numérique.

[0073] On précise ici que la référence SC utilisée dans les figures désigne la source chaude ou, par extension, la zone d'application du flux thermique émis par la source chaude directement sur la face latérale d'une enceinte de caloduc.

[0074] Sur les figures 3 à 5, on peut voir un exemple de caloduc 1 à pompage capillaire à rainures réentrantes réalisé selon la demande de brevet EP3553445.

[0075] Cet exemple de caloduc 1 à pompage capillaire s'étendant selon un axe longitudinal X est vu de l'extérieur sur la figure 3.

[0076] Le caloduc 1 comporte une enceinte étanche 2 s'étendant selon l'axe longitudinal X entre une première extrémité longitudinale 3 et une deuxième extrémité longitudinale 4. La première extrémité 3 est par exemple destinée à être échauffée par une source chaude SC pour former au sein de l'enceinte un évaporateur Z_E . La deuxième extrémité longitudinale 4 est destinée à être refroidie par une source froide SF pour former au sein de l'enceinte un condenseur Z_C .

[0077] L'enceinte étanche 2 délimite intérieurement une zone adiabatique Z_A entre l'évaporateur et le condenseur.

[0078] La source chaude est par exemple un composant électrique ou électronique, un stockage de chaleur, un réacteur chimique exothermique. La source froide est par exemple une surface radiative, des ailettes en convection

forcée, des plaques froides en écoulement mono ou diphasique, un stockage de froid, une réaction chimique endothermique...

[0079] L'enceinte étanche 2 est réalisée par empilement et assemblage de plaques d'extrémité 22 aussi appelés plaques de fermeture et de modules de plaques intercalaires 20 agencés entre les plaques d'extrémité 22, selon un procédé décrit dans la demande de brevet EP3553445.

[0080] Un module comprend au moins deux plaques intercalaires, les plaques des différents modules de plaques intermédiaires 20 comprenant des fenêtres ou d'autres structururations, étant empilées de sorte à délimiter des canaux 11, 12, 13 comme détaillé par la suite. Un module peut aussi comprendre une unique plaque usinée sur ses deux faces principales.

[0081] La réalisation, l'empilement et l'assemblage des plaques n'est pas détaillé ici, on pourra se reporter à la demande précitée EP3553445. Néanmoins, les plaques 20, 22 sont préférentiellement en alliage d'aluminium et assemblées par brasure sous vide. Les plaques en alliage d'aluminium peuvent être préférentiellement revêtues d'un cladding eutectique.

[0082] Un mode de réalisation préférentiel consiste à usiner des plaques 20 claddées sur leurs deux faces principales, puis réaliser l'assemblage de ces tôles par brasure eutectique sous vide. A titre de variante, on peut réaliser un usinage sur une seule face principale des plaques claddées.

[0083] Pour l'assemblage, différents procédés sont envisageables : brasure au bain de sel, brasure sous gaz inerte, soudage par ultrasons, soudure par friction-malaxage (« Friction Stir Welding » en anglais), collage...

[0084] Les dimensions extérieures des caloducs sont comprises entre quelques centimètres et quelques mètres. La taille maximale des caloducs est en général limitée par l'outillage disponible. En effet, l'assemblage des tôles par brasure sous vide requiert des fours sous vide de grande taille, de quelques mètres de longueur.

[0085] Pour la découpe et l'usinage des tôles, des machines de grande taille sont également requises. En outre, la tenue mécanique de tôles avec des découpes de faible largeur et de grande longueur est à prendre en compte.

[0086] Par exemple, des fenêtres sont réalisées par poinçonnage, découpage, par exemple au laser ou au jet d'eau.

[0087] Dans l'exemple illustré, toutes les plaques 20 présentent les mêmes dimensions extérieures, l'empilement définissant l'enceinte étanche 2 est alors de forme parallélépipédique rectangle avec quatre faces longitudinales parallèles au plan XY ou au plan XZ, ayant chacune une grande surface favorisant les échanges de chaleur avec la source chaude SC et la source froide SF. Dans l'exemple illustré, la face longitudinale 21 parallèle au plan XY, est celle qui reçoit le flux de chaleur (Φ_E) de la source chaude (SC).

[0088] L'empilement de plaques 20 avec leurs fenêtres ou leurs structururations 14, délimite intérieurement, dans l'évaporateur Z_E , des canaux liquides 11, un canal vapeur 13 relié aux canaux liquide 11 par des canaux de liaison 12.

[0089] Plus précisément, le canal vapeur 13 de section transversale rectangulaire constante s'étend le long de l'axe longitudinal X. Le canal vapeur 13 sert à la circulation de la phase vapeur de l'évaporateur Z_E au condenseur Z_C en passant par la zone adiabatique Z_A .

[0090] Un canal liquide 11 peut être relié ou non au canal vapeur 13 en fonction de la zone du caloduc. Lorsqu'il est relié au canal vapeur 13, comme dans l'évaporateur Z_E , un canal liquide 11 l'est par un canal de liaison 12 de section dans le plan XZ plus faible que celle du canal liquide. Chaque canal liquide 11 est destiné à la circulation du liquide du condenseur Z_C à l'évaporateur Z_E .

[0091] Un canal de liaison 12 forme une rainure réentrante en définissant une zone d'échange entre la vapeur et le liquide. Autrement dit, un canal de liaison 12 en définissant au moins une interface liquide-vapeur.

[0092] Ainsi, dans l'état de l'art, comme illustré en figures 4 et 5, les canaux de liaison 12 s'étendent selon la direction longitudinale X du caloduc. Comme symbolisé sur la figure 5, cette réalisation des canaux 12 a notamment pour inconvénient que les zones de brasage B entre plaques intermédiaires 20 au sein de l'empilement et avec les plaques d'extrémité 22 ne peuvent présentes physiquement que sur un côté longitudinal des canaux liquides 11.

[0093] Selon l'invention, comme illustré aux figures 6 à 7A, chaque canal de liaison 12 est réalisé par usinage débouchant transversalement à la direction X. Ainsi, chaque canal de liaison 12 s'étend selon la direction Y. Comme symbolisé sur les figures 7 et 7A, avec de tels canaux de liaison transversaux 12, les zones de brasage B entre plaques intermédiaires 20 et avec les plaques d'extrémité 22 sont présentes physiquement des deux côtés longitudinaux des canaux liquides 11.

[0094] A titre d'exemple, notamment pour un caloduc en alliage d'aluminium utilisant l'ammoniac comme fluide de travail, les plaques intercalaires 20 ont une épaisseur comprise entre 0,5 mm et 6 mm, de préférence égale à 2 mm.

[0095] Les plaques d'extrémité 22 ont une épaisseur comprise entre 1 mm et 3 mm, de préférence égale à 2 mm.

[0096] La largeur dans le plan XZ d'un canal de liaison 12 est comprise entre 0,1 et 1mm, de préférence de l'ordre de 0,2mm.

[0097] L'épaisseur de structuration 14 dans le plan XZ délimitant l'espace entre deux canaux de liaison adjacents est comprise entre 0,2 et 2mm, de préférence de l'ordre de 0,4mm.

[0098] La largeur dans le plan YZ d'un canal liquide 11 est comprise entre 0,5 et 4mm, de préférence de l'ordre de 3mm.

[0099] Les dimensions extérieures des caloducs selon l'invention sont comprises entre quelques centimètres et quelques mètres. La taille maximale des caloducs est en général limitée par l'outillage disponible. En effet, l'assemblage des tôles par brasure sous vide requiert des fours sous vide de grande taille, de quelques mètres de longueur. Pour la

découpe et l'usinage des tôles, des machines de grande taille sont également requises. En outre, la tenue mécanique de tôles avec des découpes de faible largeur et de grande longueur est à prendre en compte. Par exemple, les fenêtres sont réalisées par poinçonnage, découpage, par exemple au laser ou au jet d'eau.

[0100] Le fait de réaliser des canaux de liaison 12 transversalement à l'axe longitudinal du caloduc permet d'augmenter les zones de brasage B entre plaques 20, 22, puisque présentes désormais de part et d'autre de chaque canal liquide 11. On augmente ainsi la résistance à la pression du caloduc et par-là on peut diminuer les épaisseurs périphériques dans la section du caloduc, et donc on réalise un gain de masse et de volume pour un caloduc 1 selon l'invention.

[0101] Pour mettre en exergue ces gains en volume et masse d'un caloduc 1 réalisé avec des canaux de liaison transversaux 12, i.e. selon la direction Y comparativement à un caloduc selon l'état de l'art avec des canaux de liaison longitudinaux, i.e. selon la direction X, les inventeurs de la présente invention ont réalisé des calculs mécaniques par éléments finis.

[0102] Ces configurations comparatives sont illustrées respectivement aux figures 8 et 10 pour un caloduc 1 selon l'état de l'art et aux figures 9 et 10 pour un caloduc 1 selon l'invention.

[0103] Les calculs mécaniques montrent ainsi qu'en appliquant une pression interne de 130 bars, il faudrait, pour ne pas dépasser la limite élastique de l'alliage d'aluminium, des plaques de fermeture 22 de 2,1mm d'épaisseur pour le caloduc 1 selon les figures 8 et 10, tandis qu'une épaisseur de 1,4mm suffit pour un caloduc 1 selon l'invention. Par conséquent, cela représente un gain en masse de 24%, et un gain de volume de 11% à limite capillaire égale.

[0104] D'autres calculs thermo-hydrauliques permettent d'établir également des gains pour un caloduc 1 selon l'invention comparativement à un caloduc 1 selon l'état de l'art.

[0105] La figure 12 illustre respectivement les gains sur le volume du ménisque d'interface liquide-vapeur et sur la longueur des lignes triples en fonction de l'espace entre deux canaux de liaison transversaux 12 adjacents.. On précise ici que pour l'exemple comparatif selon l'état de l'art et l'exemple selon l'invention, la largeur des canaux de liaison 12 est la même et égale à 0,2mm.

[0106] De ces courbes de la figure 12, il ressort que :

- pour un espace entre deux canaux transversaux 12, égal à 8 mm, le volume du ménisque est équivalent à celui d'un caloduc 1 selon l'état de l'art. En revanche, le gain est de 40% sur la longueur des lignes triples,
- pour un espace entre deux canaux transversaux 12, égal à 4 mm, le gain en volume du ménisque est de 60% comparativement à celui d'un caloduc 1 selon l'état de l'art. Le gain est de 140% sur la longueur des lignes triples.

[0107] Cela implique donc un gain sur la résistance thermique à l'évaporateur Z_E et au condenseur Z_c qui doit dépendre de la longueur des lignes triples.

[0108] Par ailleurs, le volume du ménisque est plus important ce qui permet de réduire la longueur d'un canal de liaison 12 (pour retrouver un volume de ménisque équivalent), ou d'avoir plus de sécurité en cas de reculée du ménisque pour éviter le désamorçage du caloduc.

[0109] Cela permet aussi d'accommoder une plus grande variation du volume de liquide dans le caloduc et donc potentiellement d'élargir, à taux de remplissage donné, sur la plage de température d'opérations.

[0110] Les figures 13 et 14 illustrent respectivement la possibilité d'avoir le flux de chaleur (Φ_E) de la source chaude (SC) sur une face latérale 21 de l'enceinte 2 en regard des canaux liquides 11 ou en regard du canal vapeur 13.

[0111] Dans l'exemple illustré précédemment, les canaux de liaison 12 transversaux sont usinés sur chaque côté longitudinal au niveau d'une structuration 14 d'une plaque intercalaire 20. Alternativement, on peut prévoir de les usiner uniquement sur un seul côté longitudinal, comme illustré sur la figure 15.

[0112] La figure 16 illustre une variante de réalisation avantageuse où les canaux de liaison transversaux 12 selon l'invention sont réalisés sur toute l'épaisseur des plaques intercalaires de l'empilement. Autrement dit, ces canaux 12 sont prolongés par des extensions rainurées 15.

[0113] Cette variante de la figure 16 facilite tout d'abord l'usinage des canaux de liaison 12 car ils sont réalisés en une seule opération sur chaque plaque intermédiaire 20. Ensuite ces extensions débouchantes 15 permettent de faire communiquer partiellement les canaux ré entrants entre eux (d'un canal liquide 11 à un autre), ce qui peut permettre d'équilibrer les écoulements dans ceux-ci, notamment s'il y a un écoulement diphasique.

[0114] Enfin, le fait d'usiner ces canaux de liaison 12 avec extensions 15 sur toute la hauteur des plaques 20 permet d'augmenter la part liquide dans chaque canal de liaison 12, ainsi que la longueur des lignes triples, ce qui améliore davantage la résistance thermique à l'évaporateur. Ce dernier avantage est illustré sous formes de courbes en figure 17 en fonction de l'espace entre deux canaux de liaison transversaux 12 adjacents.

[0115] De ces courbes de la figure 17, il ressort que :

- pour un espace entre deux canaux transversaux 12 avec extensions 15 sur toute la hauteur des plaques 20, égal à 8 mm, les gains en volume du ménisque et sur la longueur des lignes triples sont respectivement de 70% et de

90% comparativement à celui d'un caloduc 1 selon l'état de l'art ;

- pour un espace entre deux canaux transversaux 12, égal à 4 mm, le gain en volume du ménisque est de 180% comparativement à celui d'un caloduc 1 selon l'état de l'art. Le gain est de 210% sur la longueur des lignes triples.

[0116] Les canaux de liaison transversaux 12 peuvent être alignés d'une plaque 20 à l'autre ou agencés en quinconce dans le plan XZ comme illustré sur la figure 18.

[0117] La figure 19 illustre une variante avantageuse selon laquelle plusieurs rainures longitudinales non débouchantes 16 sont réalisées côté du canal vapeur 13 dans chaque plaque intercalaire 20. Ces rainures 16 permettent d'augmenter la surface de contact entre liquide et vapeur, et la longueur des lignes triples, et par-là de diminuer la résistance thermique dans la zone d'évaporation. La largeur de ces rainures supplémentaires 16 est de préférence égale à celle des canaux de liaison transversaux 12 et leur profondeur avantageusement égale à leur largeur. Dans la figure 19, les rainures non débouchantes 16 croisent des canaux de liaison transversaux 12 réalisés sur toute la hauteur et alignés d'une plaque à l'autre. On peut bien entendu réaliser une configuration avec des canaux de liaison transversaux 12 sur une partie de la hauteur des plaques 20 et/ou agencés en quinconce.

[0118] La figure 20 illustre une variante avantageuse selon laquelle plusieurs rainures longitudinales 17 sont réalisées sur la structuration 14 de chaque plaque intercalaire 20 dans la zone d'interface d'empilement avec une plaque intercalaire 20 ou une plaque de fermeture 22 adjacente. Ces rainures 17 sont destinées à éviter de boucher les canaux de liaison 12 avec de la brasure lors de l'opération de brasage entre plaques 20, 22. En effet, en cas de brasure en excès, celle-ci va pouvoir se loger dans ces rainures 17 et donc ne pas venir se loger dans les canaux de liaison transversaux 12. La largeur de ces rainures de brasage 17 est de préférence égale ou légèrement plus faible à celle des canaux de liaison 12 afin de favoriser par pompage capillaire le piégeage préférentiel de la brasure en excès dans ces zones. Dans la figure 19, les rainures non débouchantes de brasage 17 sont réalisées sur un seul côté longitudinal de structurations 14 d'une plaque intercalaire 20. On peut bien entendu réaliser ces rainures 17 sur les deux côtés longitudinaux des structurations 14 de chaque plaque 20.

[0119] D'autres avantages et améliorations pourront être apportées sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

[0120] L'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits; on peut notamment combiner entre elles des caractéristiques des exemples illustrés au sein de variantes non illustrées.

[0121] Toutes les variantes peuvent être combinées ou non entre elles : on peut par exemple avoir des rainures longitudinales non débouchantes 16 combinée avec des canaux de liaison transversaux 12 sur toute la hauteur des plaques intercalaires 20, par exemple en quinconce, et le cas échéant avec des rainures longitudinales 17 de brasage à l'interface entre plaques 20 ou 20, 22.

[0122] Un caloduc est rempli d'un fluide diphasique, il peut s'agir d'un fluide bien connu de l'homme du métier. Celui-ci est choisi par exemple en fonction de la gamme de température de fonctionnement et de stockage du dispositif, en fonction des contraintes dues à la pression, l'inflammabilité, la toxicité du fluide et de la compatibilité chimique entre le fluide et le matériau formant le caloduc.

[0123] De plus, certains fluides ne sont pas compatibles avec certains matériaux, des réactions d'oxy-réduction pouvant conduire à des phénomènes corrosifs impliquant des produits de réaction, par exemple des gaz incondensables, dégradant le fonctionnement hydrodynamique des caloducs.

[0124] A titre d'exemple, pour un caloduc selon l'invention réalisé en alliage d'aluminium en nickel, en cuivre, en titane ou en alliage à base d'une combinaison d'entre eux, assemblé par brasure eutectique, on peut utiliser comme fluide l'ammoniac, l'eau, l'acétone, le méthanol,

[0125] Du fait des limites d'utilisation, entre les fluides de travail et les métaux cités, les couples envisagés peuvent être comme suit :

Fluide de travail	Métal(ux) du caloduc
Ammoniac	Aluminium, acier, acier inoxydable, nickel
Méthanol	Cuivre, acier inoxydable
Acétone	Aluminium, acier inoxydable
Eau	Cuivre, nickel, titane

Liste des références citées

[0126]

[1] : Christine Hoa : «Thermique des caloducs à rainures axiales : études et réalisations pour des applications spatiales». Université de Poitiers, 2004.

[2]: S. W. Chi, "Heat Pipe Theory and Practice," McGraw-Hill, NY, U.S.A., 1976.

5

Revendications

1. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes, s'étendant le long d'une première direction longitudinale (X), comprenant une enceinte étanche (2) s'étendant entre une première extrémité longitudinale (3), destinée à être échauffée par une source chaude SC pour former, au sein de l'enceinte, un évaporateur et une deuxième extrémité longitudinale (4) destinée à être refroidie par une source froide SF pour former, au sein de l'enceinte, un condenseur, l'enceinte étanche délimitant une zone adiabatique entre l'évaporateur et le condenseur, l'enceinte étanche comprenant un empilement de plaques (20, 22) selon une deuxième direction (Z), orthogonale à la première (X) direction, dont deux plaques de fermeture (22) et au moins un nombre de n modules les uns sur les autres avec n étant un entier >1, chaque module comprenant au moins une plaque intercalaire (20) entre les plaques de fermeture, la ou les plaques intercalaires comprenant au moins une première plaque intercalaire comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie un canal vapeur (13) s'étendant le long de la première direction (X) entre l'évaporateur et le condenseur, dans lequel la vapeur est destinée à circuler, et sur au moins un côté latéral de la fenêtre selon une troisième direction (Y) orthogonale aux première (X) et deuxième direction (Z), au moins une structuration (14) dont les bords délimitent en partie au moins un canal liquide (11) dans l'évaporateur et le condenseur, le caloduc comprenant, au moins dans l'évaporateur, au moins une zone d'échange définissant une interface liquide-vapeur et délimitée entre la au moins une plaque intercalaire et au moins une autre plaque intercalaire ou une plaque de fermeture, reliant le canal vapeur et le(s) canal(ux) liquide(s), chaque zone d'échange comprenant une pluralité de canaux de liaison, débouchants (12) qui s'étendent transversalement à la première direction (X), de préférence selon la troisième direction (Y), deux canaux de liaison adjacents étant séparés par une épaisseur de structuration.
2. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon la revendication 1, le condenseur du caloduc comprenant également au moins une zone d'échange définissant une interface liquide-vapeur et délimitée entre la au moins une plaque intercalaire et au moins une autre plaque intercalaire ou une plaque de fermeture, reliant le canal vapeur et le(s) canal(ux) liquide(s), chaque zone d'échange comprenant au moins un canal de liaison, débouchant (12) qui s'étend transversalement à la première direction (X), de préférence selon la troisième direction (Y).
3. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon la revendication 2, la section transversale dans le plan XZ de chaque canal de liaison débouchant (12) dans le condenseur étant supérieure à celle dans l'évaporateur.
4. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, la zone adiabatique du caloduc étant exempte de zone d'échange entre le canal vapeur et le(s) canal(ux) liquide(s).
5. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, le matériau constitutif des plaques formant l'enceinte étanche, étant choisi parmi l'aluminium, le cuivre, le nickel, ou un alliage à base d'au moins deux de ceux-ci.
6. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, les plaques intercalaires (20) présentant une épaisseur comprise entre 0,5 à 6mm, de préférence de l'ordre de 2mm.
7. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, les plaques de fermeture (22) présentant une épaisseur comprise entre 1 et 3mm, de préférence de l'ordre de 2mm.
8. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, la largeur dans le plan XZ d'un canal de liaison (12) étant comprise entre 0,1 et 1mm, de préférence de l'ordre de 0,2mm.
9. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, l'épaisseur de structuration (14) dans le plan XZ délimitant l'espace entre deux canaux de liaison (12) adjacents étant comprise entre 0,2 et 2mm, de préférence de l'ordre de 0,4mm.
10. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, la largeur dans le plan YZ d'un canal liquide (11) étant comprise entre 0,5 et 4mm, de préférence de l'ordre de 3mm.

11. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, chaque canal de liaison (12, 15) étant réalisé débouchant sur toute l'épaisseur dans le plan YZ d'une structuration (14) d'une plaque intercalaire (20).

12. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, les canaux de liaison (12) étant réalisés de telle sorte à être agencés en quinconce dans un plan XZ.

13. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, les structurations (14) comprenant des rainures longitudinales (16), non débouchantes, qui s'étendent selon la première direction (X), du côté du canal vapeur (13), en croisant les canaux de liaison (12).

14. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon la revendication 13, la largeur dans le plan YZ des rainures longitudinales (16) étant sensiblement égale à la largeur dans le plan XZ des canaux de liaison (12).

15. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon la revendication 13 ou 14, la largeur dans le plan YZ des rainures longitudinales (16) étant sensiblement égale à leur profondeur selon la troisième direction (Y).

16. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, au moins une plaque intercalaire comprenant des rainures longitudinales (17) qui s'étendent selon la première direction (X), à l'interface avec une plaque intercalaire adjacente ou une plaque de fermeture (22), en croisant les canaux de liaison (12).

17. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, comportant n modules les uns sur les autres, n étant un entier supérieur ou égal à 1, définissant un canal vapeur unique et n canaux liquides sur au moins un côté latéral, notamment sur chaque côté latéral du canal vapeur.

18. Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, la section transversale dans le plan YZ du canal vapeur et du(des) canal(ux) liquide(s), de préférence rectangulaire, étant constante sur toute la longueur du caloduc.

19. Système comprenant :

- une source froide (SF) ;
- une source chaude (SC) et
- au moins un caloduc (1) selon l'une des revendications précédentes, le caloduc étant agencé de sorte que le flux de chaleur (Φ_E) de la source chaude (SC) sur l'évaporateur étant sur au moins une face latérale (21) de l'enceinte en regard du canal vapeur ou sur au moins une face latérale en regard du(des) canal(ux) liquide(s), tandis que l'extraction de chaleur au condenseur vers la source froide (SF) étant sur au moins une face latérale de l'enceinte en regard du(des) canal(ux) liquide(s), ou sur une face latérale perpendiculaire à celui-ci (ceux-ci).

[Fig 1]

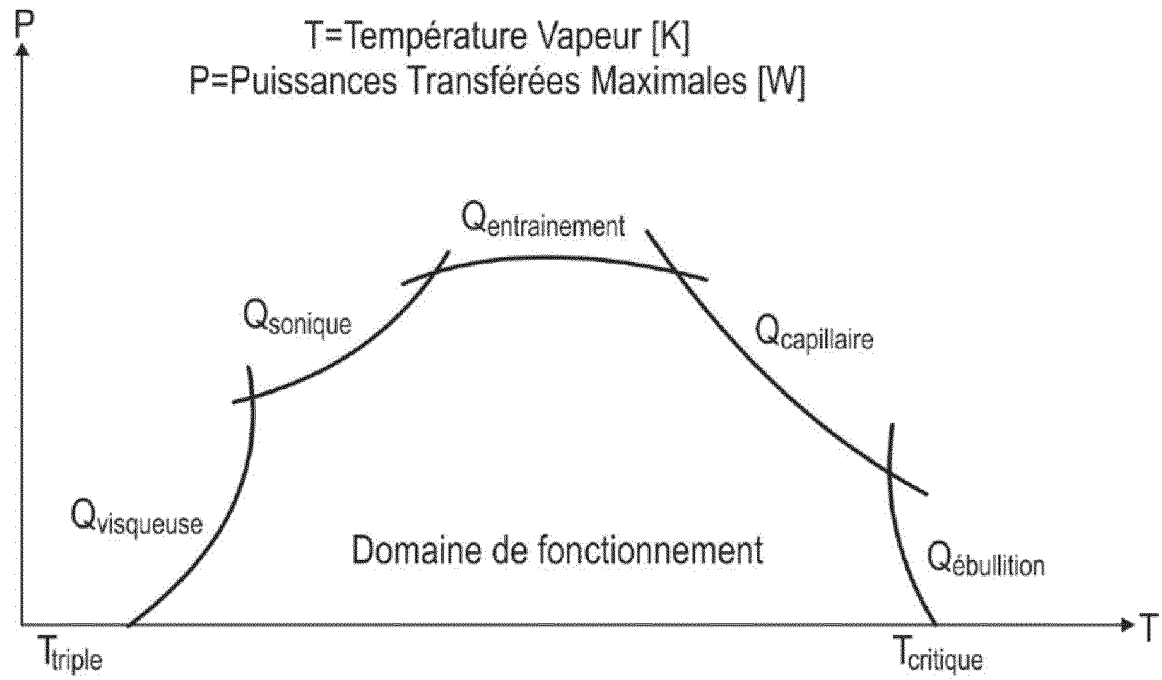


Fig. 1

[Fig 2]

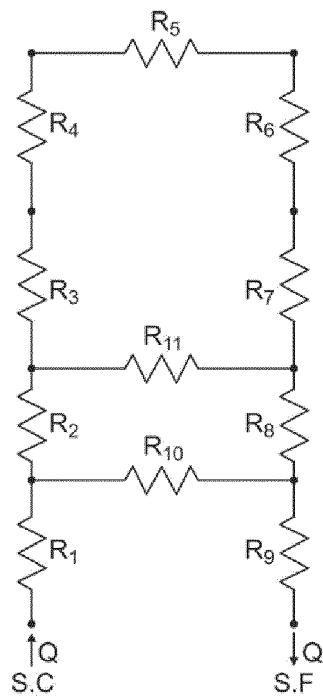


Fig. 2

[Fig 3]

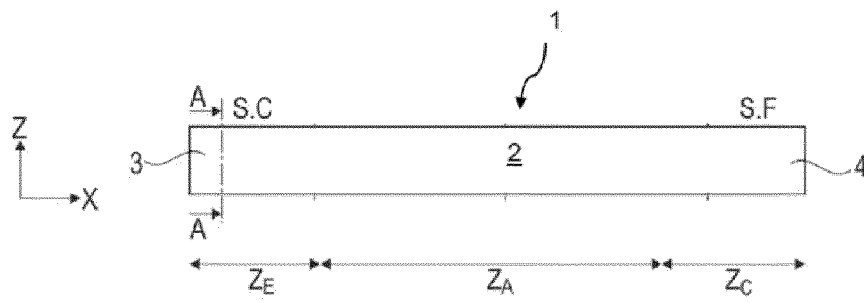


Fig.3
(ETAT DE L'ART)

[Fig 4]

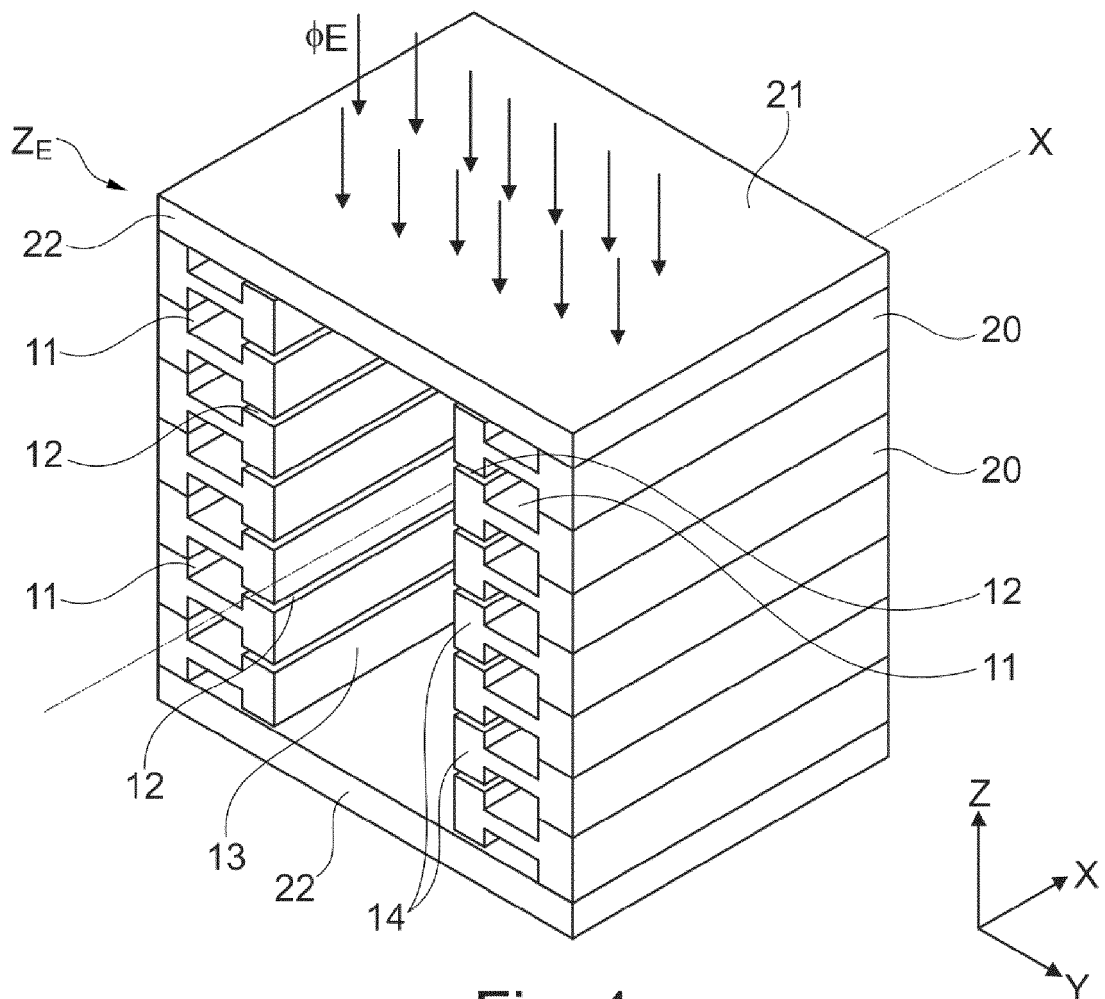


Fig. 4
(ETAT DE L'ART)

[Fig 5]

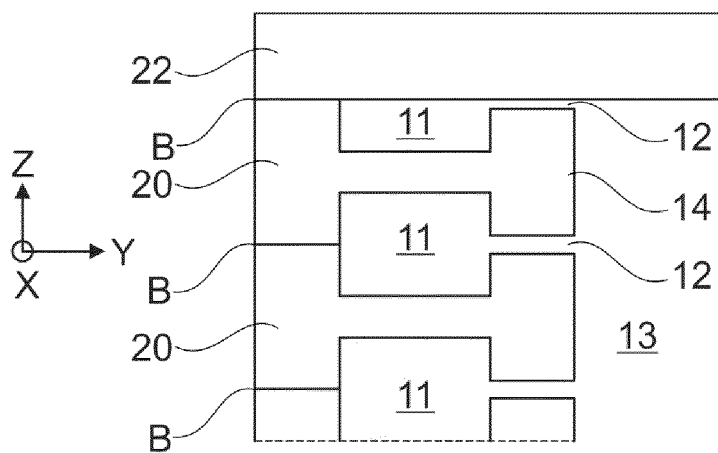


Fig. 5
(ETAT DE L'ART)

[Fig 6]

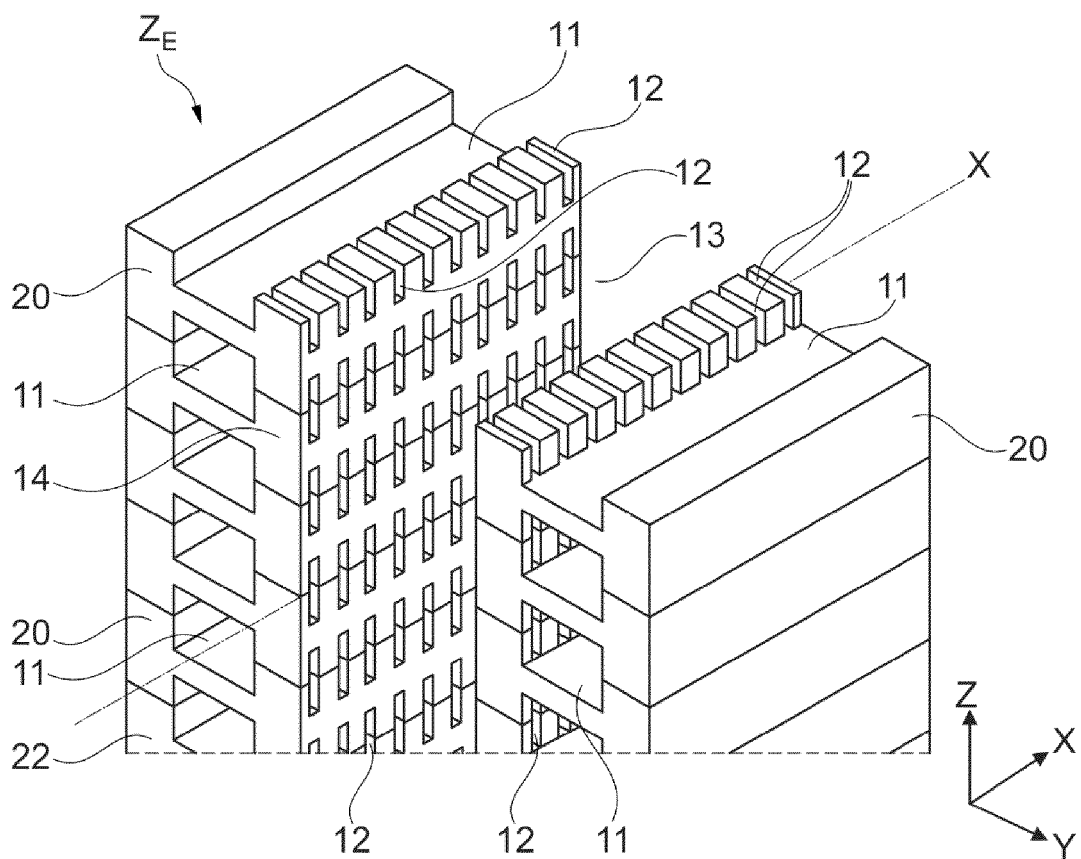


Fig. 6

[Fig 7]

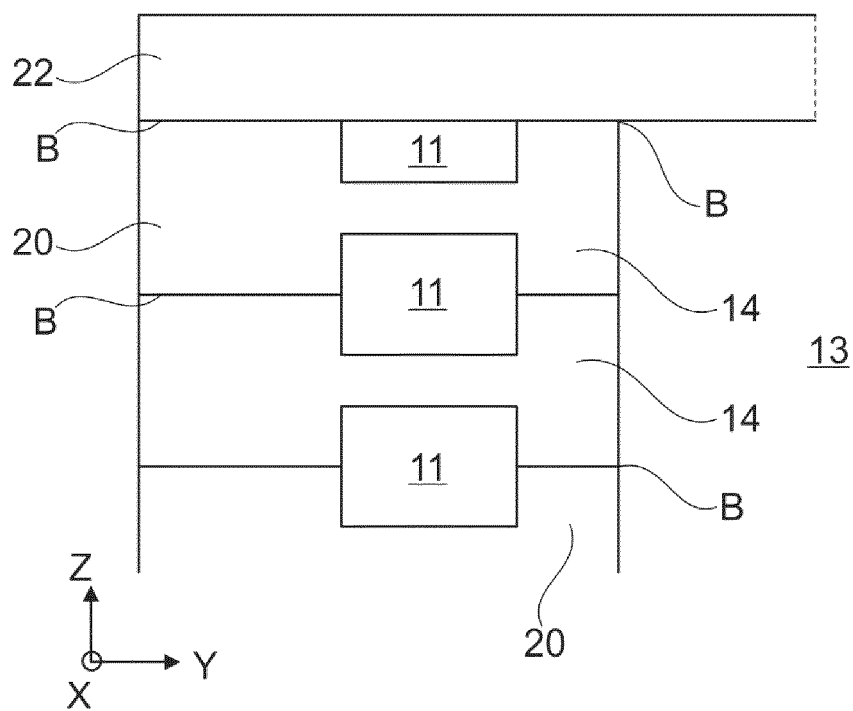


Fig. 7

[Fig 7A]

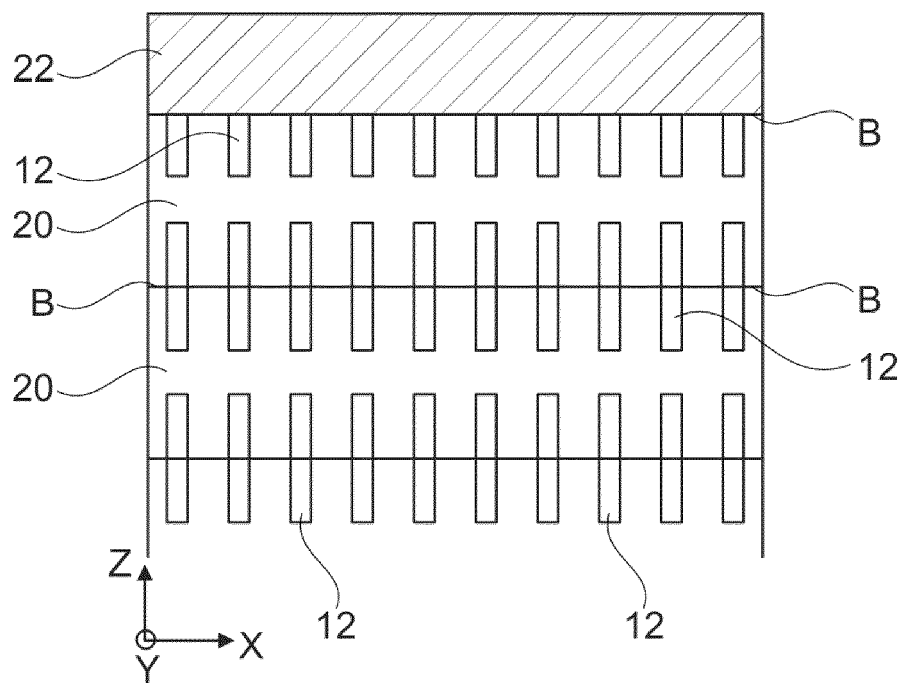


Fig. 7A

[Fig 8]

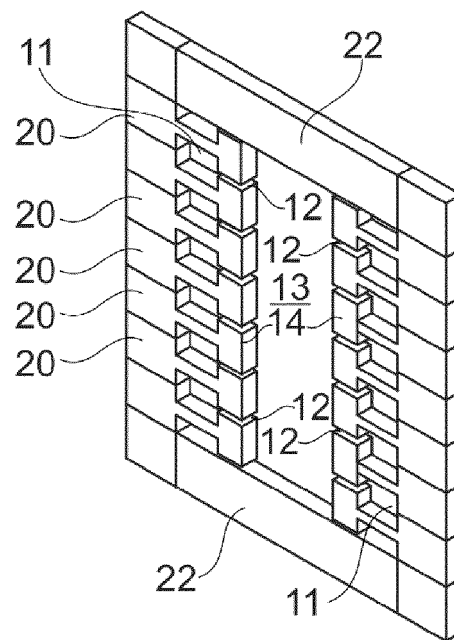


Fig. 8
(ETAT DE L'ART)

[Fig 9]

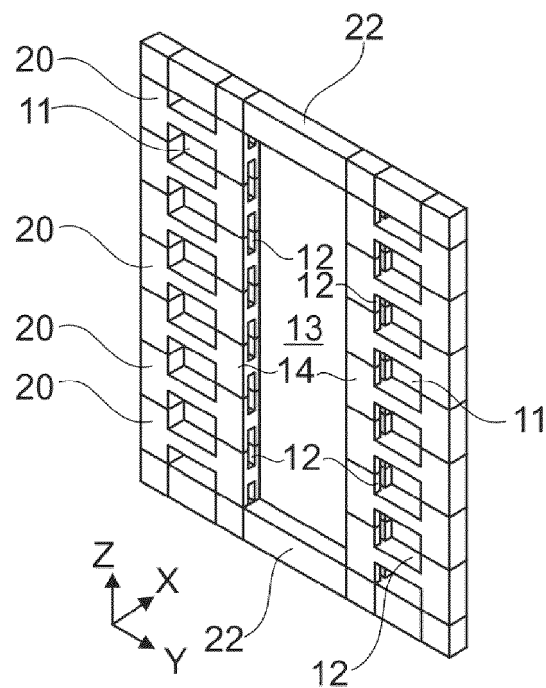


Fig. 9

[Fig 10]

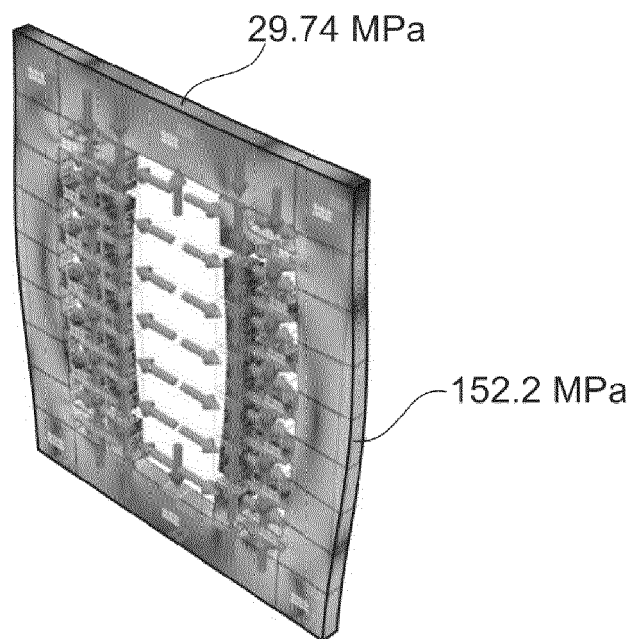


Fig. 10
(ETAT DE L'ART)

[Fig 11]

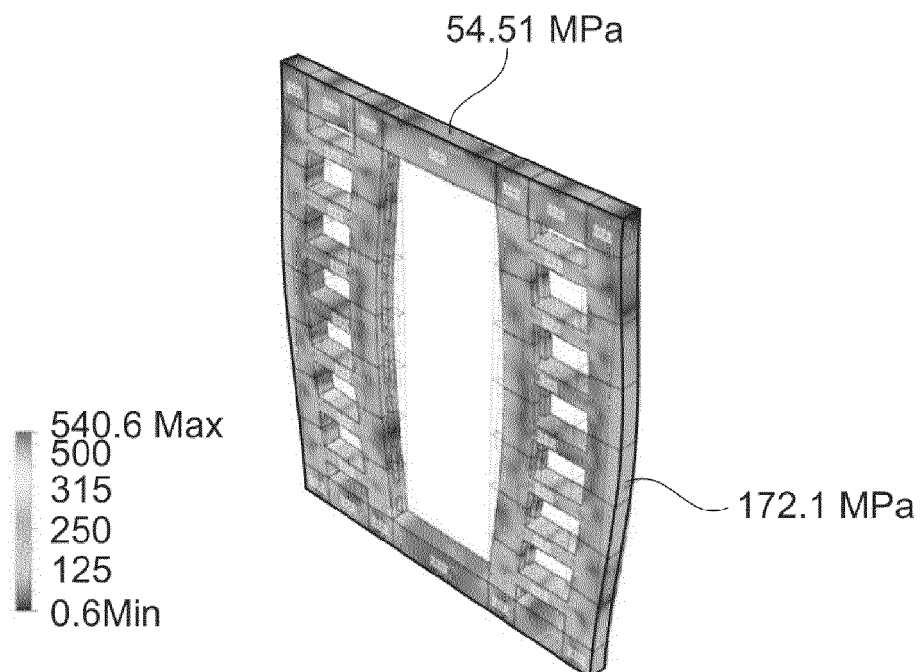


Fig. 11

[Fig 12]

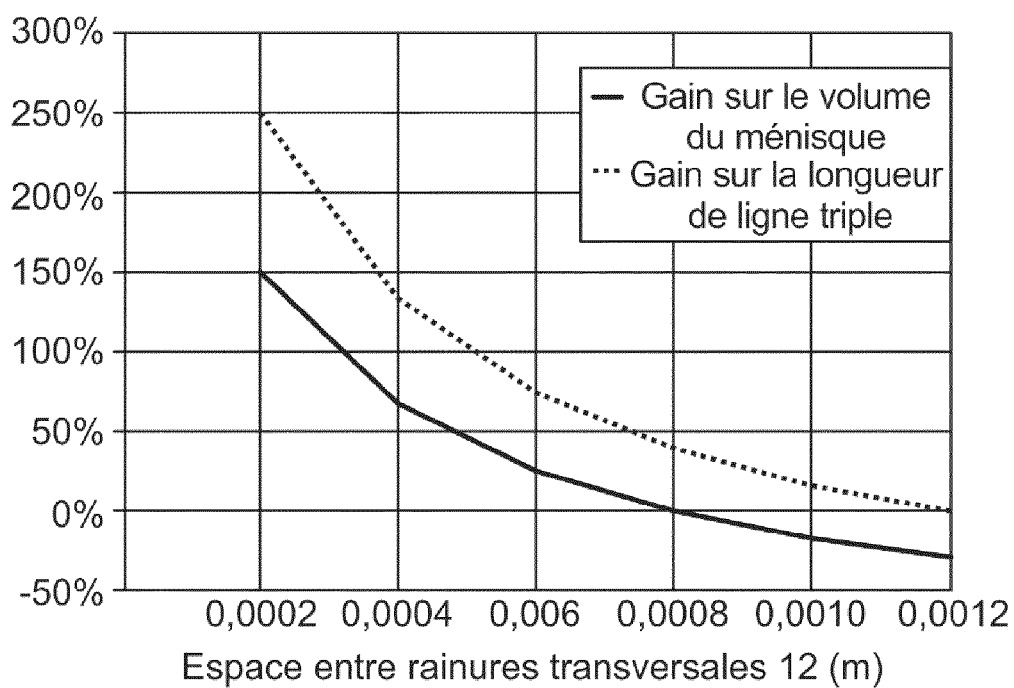


Fig. 12

[Fig 13]

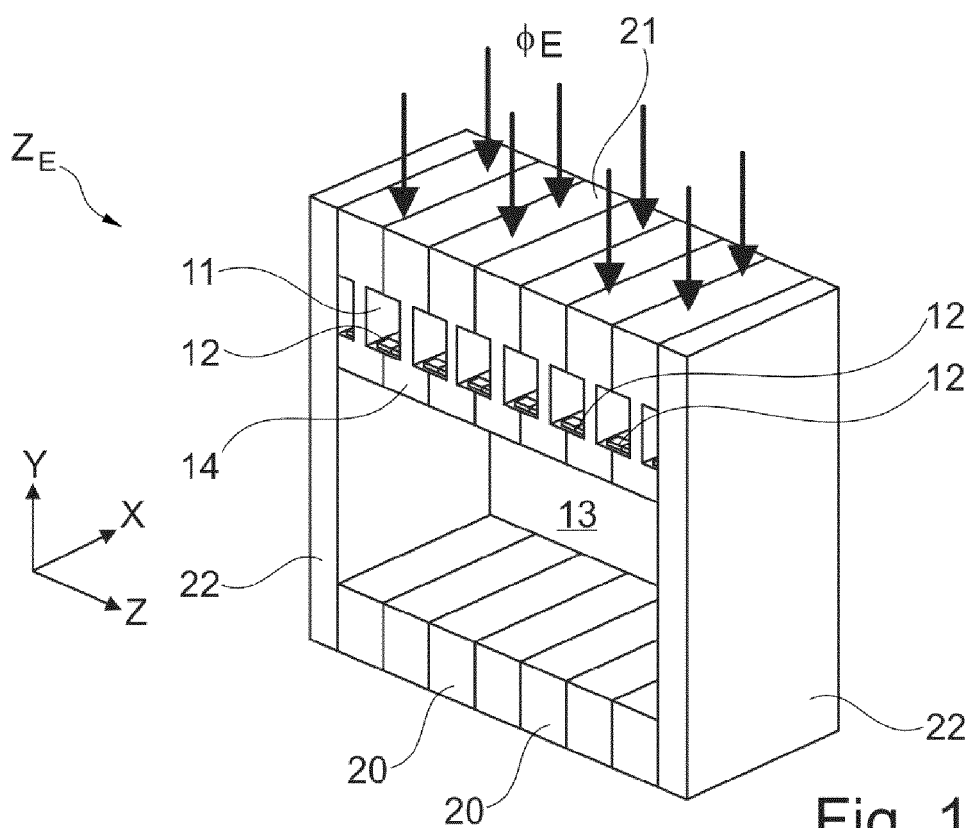


Fig. 13

[Fig 14]

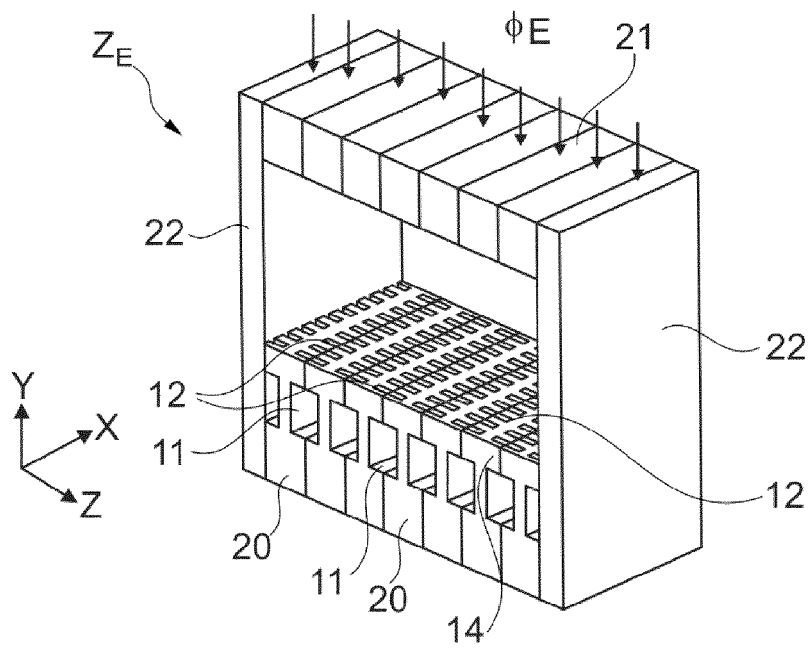


Fig. 14

[Fig 15]

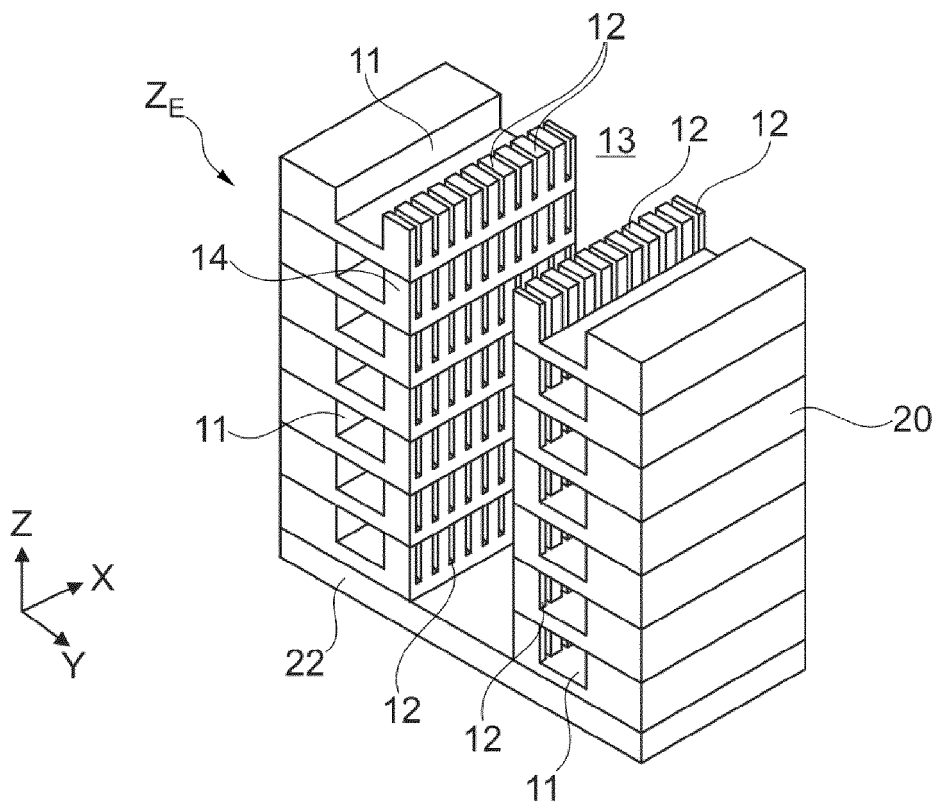


Fig. 15

[Fig 16]

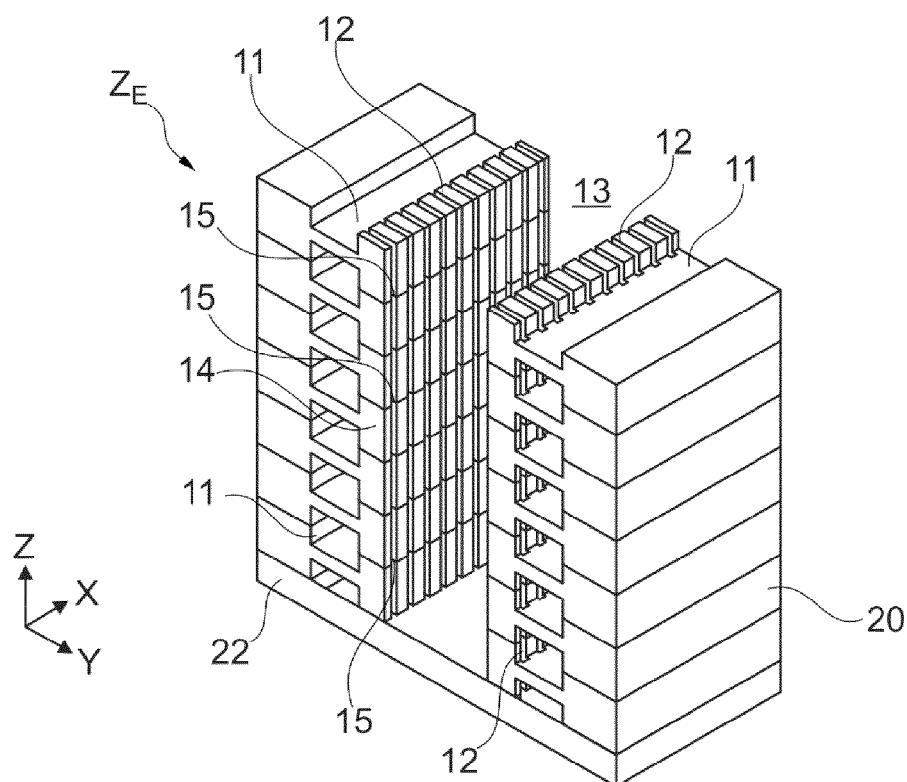


Fig. 16

[Fig 17]

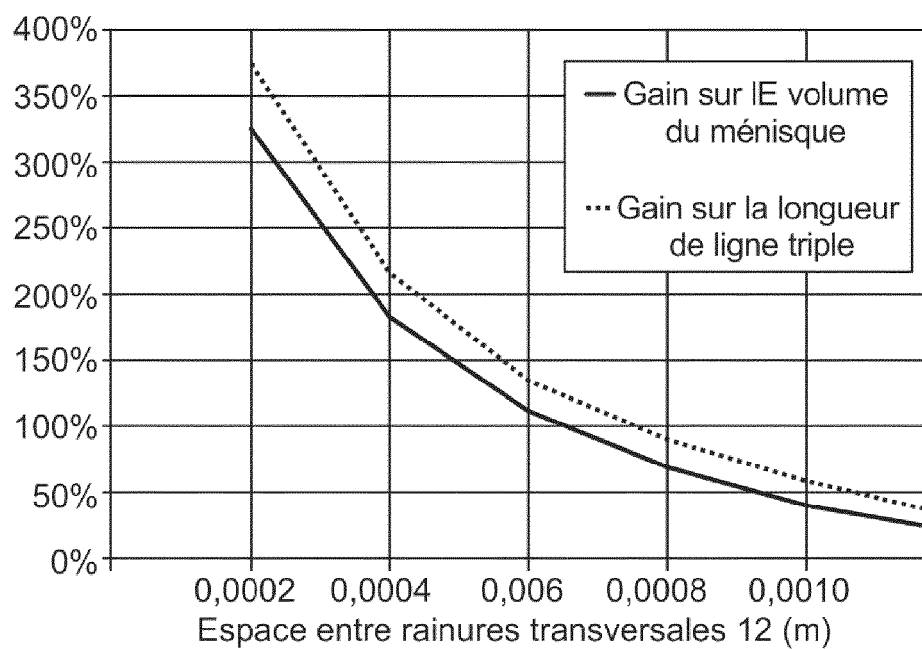


Fig. 17

[Fig 18]

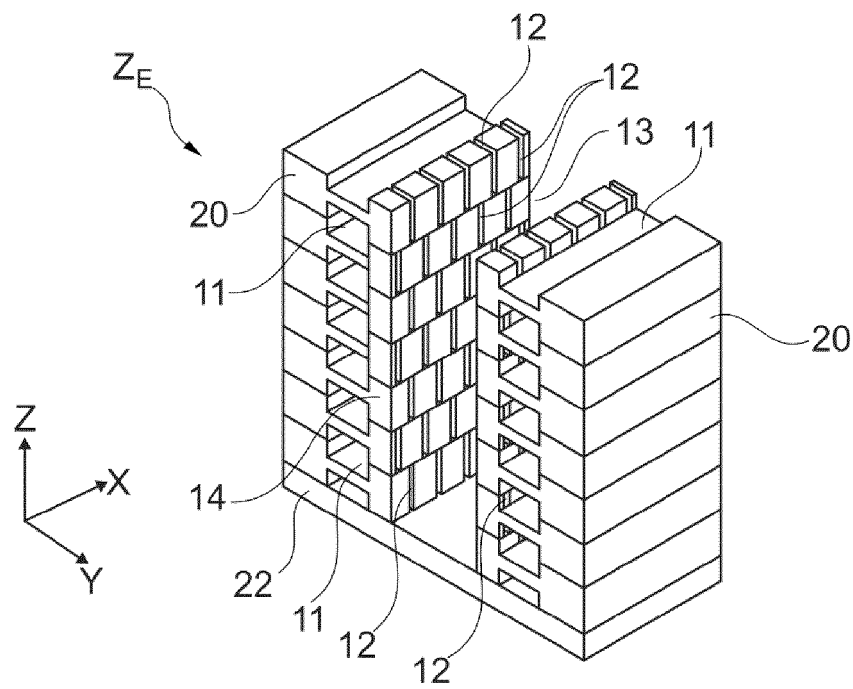


Fig. 18

[Fig 19]

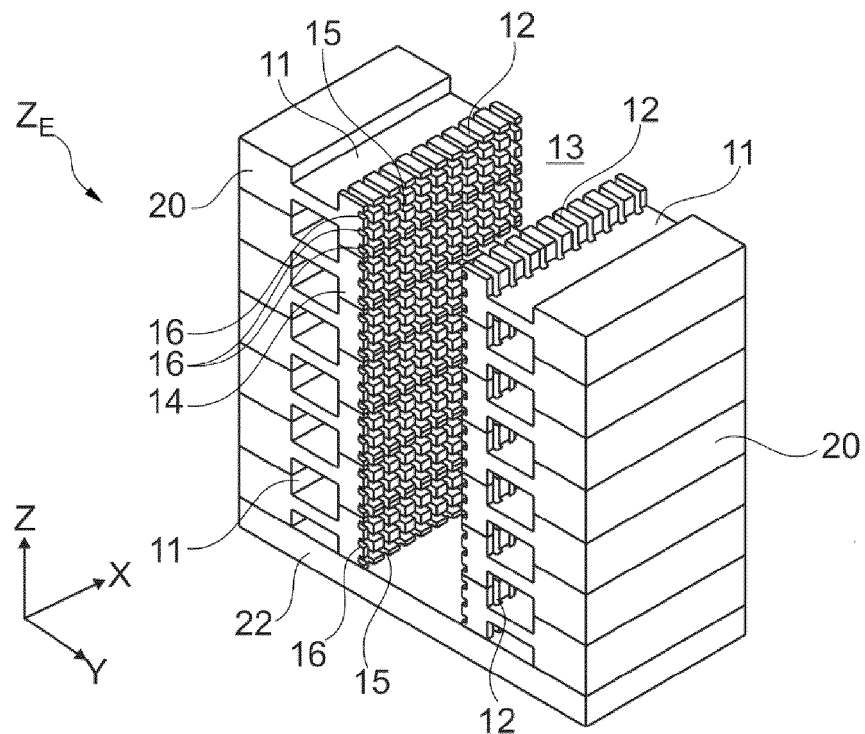


Fig. 19

[Fig 20]

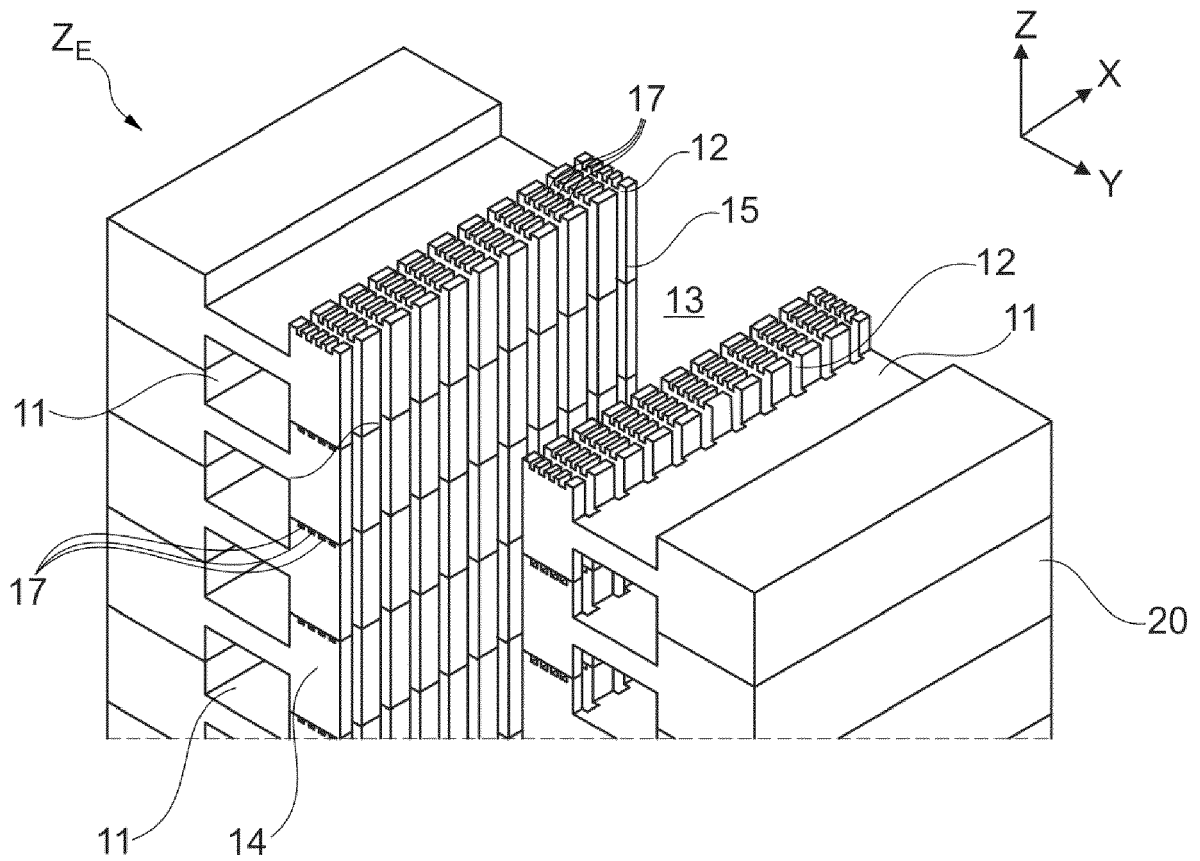


Fig. 20



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 23 19 1678

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	EP 3 553 445 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR]) 16 octobre 2019 (2019-10-16) * alinéas [0069], [0091], [0185], [0192], [0216]; figure 7 *	1-19	INV. F28D15/04 F28D15/02 F28F3/08
A	CN 112 747 615 A (SHINKO ELECTRIC IND CO) 4 mai 2021 (2021-05-04) * figures 5, 6 *	1-19	
A	CN 105 814 389 A (FUJITSU LTD) 27 juillet 2016 (2016-07-27) * figure 7 *	1-19	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)
			F28D F28F
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche		Date d'achèvement de la recherche	Examineur
Munich		3 novembre 2023	Delaitre, Maxime
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 23 19 1678

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

03-11-2023

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 3553445 A1	16-10-2019	EP 3553445 A1	16-10-2019
		FR 3080172 A1	18-10-2019

CN 112747615 A	04-05-2021	CN 112747615 A	04-05-2021
		EP 3816563 A1	05-05-2021
		JP 7353132 B2	29-09-2023
		JP 2021071239 A	06-05-2021
		US 2021131742 A1	06-05-2021

CN 105814389 A	27-07-2016	CN 105814389 A	27-07-2016
		JP 6146484 B2	14-06-2017
		JP WO2015087451 A1	16-03-2017
		US 2016259383 A1	08-09-2016
		US 2021232189 A1	29-07-2021
		WO 2015087451 A1	18-06-2015

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- EP 3553445 A1 [0017] [0026] [0040]
- US 7051793 B [0018]
- EP 3553445 A [0067] [0068] [0070] [0074] [0079] [0081]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **CHRISTINE HOA.** Thermique des caloducs à rainures axiales : études et réalisations pour des applications spatiales. Université de Poitiers, 2004 [0126]
- **S. W. CHI.** Heat Pipe Theory and Practice. McGraw-Hill, 1976 [0126]