

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

①1 N° de publication : **3 138 942**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **22 08353**

⑤1 Int Cl⁸ : **F 28 D 15/04 (2022.01)**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤4 Caloduc de type à pompage capillaire, à rainures réentrantes intégrant au moins un substrat poreux à l'évaporateur.

②2 Date de dépôt : 17.08.22.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public
de la demande : 23.02.24 Bulletin 24/08.

④5 Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 16.08.24 Bulletin 24/33.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public à caractère industriel et
commercial — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : MARIOTTO Mathieu, CHAMPEL
Bénédicte et GRUSS Jean-Antoine.

⑦3 Titulaire(s) : *COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
Etablissement public à caractère industriel et
commercial.*

⑦4 Mandataire(s) : CABINET NONY.

FR 3 138 942 - B1



Description

Titre de l'invention : Caloduc de type à pompage capillaire, à rainures réentrantes intégrant au moins un substrat poreux à l'évaporateur.

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne un caloduc de type à pompage capillaire à rainures réentrantes.
- [0002] La présente invention vise à améliorer le pompage capillaire, tout en assurant un flux de chaleur surfacique élevé d'un tel caloduc.

Technique antérieure

- [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.
- [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 équilibre entre la phase liquide et la phase vapeur.
- [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 condensé (le condensat) 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.
- [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 œuvre dans des conditions de fonctionnement

spatiales, comme pour la thermalisation de système de télécommunication des satellites. 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 œuvre.

- [0007] 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 cœur vapeur et un réseau capillaire périphérique 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.
- [0008] 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.
- [0009] 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.
- [0010] Les caloducs à rainures réentrantées 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 dans la phase liquide. Ces caloducs sont utilisés principalement dans le domaine spatial, par exemple pour la régulation thermique dans les satellites et/ou les engins spatiaux.
- [0011] Les techniques de réalisation connues des caloducs à rainures, et notamment des caloducs à rainures réentrantées, ne permettent pas d'obtenir des rainures ayant une profondeur sensiblement plus grande que leur largeur.
- [0012] Ces caloducs sont réalisés essentiellement par extrusion avec ou sans mandrin flottant comprenant le motif des rainures. Ce procédé permet de réaliser, généralement dans des métaux relativement mous (aluminium ou cuivre), des tubes généralement cylindriques pourvus de rainures internes longitudinales ou légèrement spiralées à l'intérieur du tube.
- [0013] Ces tubes sont également utilisés dans les évaporateurs et condenseurs, mais peuvent également être utilisés pour réaliser des caloducs.
- [0014] Les rainures sont généralement rectangulaires ou trapézoïdales et d'un rapport d'aspect limité par le procédé d'extrusion. La profondeur des rainures peut aller généralement jusqu'à 0,2mm avec un rapport d'aspect profondeur/largeur de l'ordre de 1 maximum.

- [0015] 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.
- [0016] 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.
- [0017] Une autre technique utilise la gravure chimique. Mais elle ne permet pas non plus d'avoir un rapport profondeur sur largeur important.
- [0018] 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.
- [0019] Sur la plage de températures de fonctionnement d'un caloduc, différentes limites physiques peuvent limiter ses performances.
- [0020] 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.
- [0021] La [Fig.1] illustre la courbe délimitant le domaine de fonctionnement pour un exemple de caloduc à pompage capillaire. Sur cette [Fig.1], on rappelle que les portions de courbe $Q_{\text{visqueuse}}$, Q_{sonique} , $Q_{\text{entraînement}}$, $Q_{\text{capillaire}}$, $Q_{\text{ébullition}}$, définissent respectivement les limites visqueuse, sonique, d'entraînement, capillaire et d'ébullition.
- [0022] 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 qui sont croissantes avec le débit massique du fluide de travail (et avec la longueur du caloduc), lui-même fonction de la puissance thermique imposée à l'évaporateur : la limite capillaire est atteinte lorsque la pression motrice capillaire est égale à la somme des pertes de charges (phase liquide et phase vapeur). 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.
- [0023] 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.

[0024] Les pertes de charge par frottement dans un écoulement s'expriment par l'équation de Darcy-Weisbach comme suit :

[0025] [Equation 1]

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

[0026] dans laquelle :

[0027] 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),

[0028] v la vitesse du fluide de travail (proportionnelle à la puissance thermique à transporter),

[0029] ρ la masse volumique du fluide de travail et

[0030] D_h le diamètre hydraulique.

[0031] Le diamètre hydraulique est lui-même défini par l'équation suivante:

[0032] [Equation 2]

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

[0033] avec S la section du fluide et P_m le périmètre mouillé.

[0034] 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.

[0035] 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.

[0036] 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.

[0037] Par ailleurs également, lors de l'évaporation se réalisant au niveau 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.

- [0038] Il est donc avantageux d'avoir un volume important de liquide dans un canal de liaison, afin de minimiser ce phénomène.
- [0039] La résistance thermique globale d'un caloduc peut être évaluée en faisant une analogie de réseau de résistances thermiques indépendantes.
- [0040] Un tel réseau est schématisé en [Fig.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 SF.
- [0041] 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 [Fig.2]. 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 :
- [0042] - la résistance entre la source extérieure et la paroi $R1$, $R9$ respectivement à l'évaporateur et au condenseur;
- [0043] - la résistance de la paroi extérieure $R2$, $R8$ respectivement à l'évaporateur et au condenseur;
- [0044] - la résistance des canaux liquides (réseau capillaire) $R3$, $R7$ respectivement à l'évaporateur et au condenseur ;
- [0045] - la résistance de l'interface entre liquide et vapeur $R4$, $R6$ respectivement à l'évaporateur et au condenseur et
- [0046] - la résistance de l'écoulement de vapeur $R5$.
- [0047] Sur ce chemin, la résistance thermique limitante est celle des canaux liquides (réseau capillaire), respectivement à l'évaporateur et au condenseur ($R3$, $R7$).
- [0048] 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.
- [0049] Dans ce modèle très conservatif, la conductivité équivalente du film est donnée par une formule empirique selon l'équation 3 :
- [0050] [Equation 3]
- $$\lambda_{film} = \frac{\lambda_l}{0.185 * c}$$
- [0051] 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 ($0,4 \text{ W/m/K}$) 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.
- [0052] 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.
- [0053] 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.

- [0054] Enfin, la résistance de film dépend notamment de la longueur des lignes triples de contact entre liquide, vapeur et solide.
- [0055] 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.
- [0056] On connaît par ailleurs un autre type de caloduc, dit à artère, comme divulgué dans le brevet US4422501A, qui est un caloduc dont le retour liquide des condensats est physiquement séparé du canal où circule la vapeur après évaporation.
- [0057] Le principal avantage d'un caloduc à artère est d'annihiler le flux maximum d'entraînement des particules liquides par la vapeur en supprimant les interfaces liquide/vapeur dans la zone adiabatique du caloduc.
- [0058] De plus, la réalisation d'un caloduc à artère est bien moins onéreuse et simple à mettre en place qu'un caloduc à réseau périphérique capillaire fritté. Avec une artère de faible diamètre, suivant le fluide et les matériaux sélectionnés, si les forces capillaires sont assez importantes, un fonctionnement contre la gravité peut être escompté avec de bonnes performances.
- [0059] Un tel caloduc 1 à artère est représenté aux figures 3, 3A et 3B : tout comme les autres caloducs rectilignes, il comprend une enceinte étanche délimitée par une paroi 10 et s'étend entre une première extrémité longitudinale, destinée à être échauffée par un flux thermique Φ_E émis par une source chaude, pour former, au sein de l'enceinte, un évaporateur Z_E et une deuxième extrémité longitudinale destinée à sortir un flux thermique Φ_S vers une source froide pour former, au sein de l'enceinte, un condenseur Z_C où la vapeur V se condense, l'enceinte étanche délimitant une zone adiabatique Z_A entre l'évaporateur et le condenseur.
- [0060] Un tel caloduc 1 à artère intègre un canal liquide 11 formant une artère qui ramène le liquide depuis le condenseur Z_C vers l'évaporateur Z_E , qui est dissocié du canal vapeur 13. Dans un tel caloduc, il n'y a pas d'interface liquide-vapeur hormis à l'évaporateur Z_E et au condenseur Z_C . Cela permet en outre de réduire les forces de frottement de la phase liquide. En plus, la phase liquide au niveau de l'évaporateur Z_E n'est pas directement soumise au flux de chaleur Φ_E de la source chaude, et cela joue un rôle dans l'éloignement de la limite d'ébullition.
- [0061] Une configuration très intéressante pour une application terrestre, c'est-à-dire où la

gravité s'applique, consiste à intégrer une ou plusieurs des artères 11 dans un milieu poreux 14, périphérique au canal vapeur 13, comme illustré à la [Fig.4]. Ce milieu poreux 14, aussi appelé mèche, peut avoir des pores d'une taille moyenne de quelques centaines de microns au millimètre. En plus de la perte de pression liquide réduite qu'il induit, le milieu poreux 14 assure une très bonne limite d'ébullition au niveau de l'évaporateur par une démultiplication de lignes et de points triples P, c'est-à-dire de points de contact solide-liquide-vapeur, qui sont très favorables à l'évaporation.

- [0062] Les caloducs à rainures, notamment à rainures réentrantes ont pour inconvénient majeur d'avoir une résistance thermique élevée à l'évaporateur, et un flux thermique radial qu'il est possible de transmettre dans l'évaporateur également limité par les phénomènes d'ébullition dans les rainures. Typiquement, ce flux est limité à environ 15 W/cm² pour un caloduc ammoniac.
- [0063] Les caloducs avec une structure capillaire poreuse, telle qu'une poudre frittée, permettent d'atteindre des performances plus élevées que les caloducs à rainures. En particulier, ces caloducs avec structure capillaire poreuse permettent notamment d'accommoder des flux thermiques surfaciques à l'évaporateur beaucoup plus élevés, et d'avoir une résistance thermique à l'évaporateur plus faible. Néanmoins, ils présentent deux inconvénients majeurs suivants:
- [0064] - pour une structure réalisée par poudre frittée, il est nécessaire de fritter celle-ci à l'intérieur du caloduc, ce qui est difficilement réalisable sur des longueurs de plusieurs mètres, typiquement rencontrées dans des applications spatiales (satellites) ;
- [0065] - la taille des pores de la structure capillaire poreuse étant de quelques microns, les pertes de pression du retour de liquide dans ladite structure deviennent vite rédhibitoires sur des longueurs de plusieurs mètres, ce qui limite la puissance thermique transportable.
- [0066] Le brevet US9618275B1 décrit un caloduc à structure hybride, i.e. avec des rainures qui s'étendent longitudinalement dans la partie adiabatique et le condenseur et avec un insert poreux de forme cylindrique dans l'évaporateur. Ce caloduc à structure hybride répond partiellement à la problématique mentionnée ci-avant des caloducs à rainures. Il présente cependant plusieurs inconvénients. Tout d'abord, le retour du liquide (dans la zone évaporateur) se fait longitudinalement dans l'épaisseur de l'insert poreux cylindrique, ce qui induit une perte de pression liquide élevée. En effet, la taille des pores de l'insert poreux est intrinsèquement faible de manière à obtenir une pression capillaire élevée, mais avec la contrepartie d'induire nécessairement une perméabilité faible. Le mode de la réalisation de la [Fig.6] de ce brevet apporte une solution à ce problème de faible perméabilité : il prévoit un élargissement du diamètre de l'insert poreux dans l'évaporateur. Or, un tel élargissement induit nécessairement une augmentation de la résistance thermique dans cette zone du caloduc (évaporateur). Par

ailleurs, l'insert poreux cylindrique divulgué doit assurer une continuité fluidique avec les rainures de la zone adiabatique, faute de quoi le pompage capillaire risque de se désamorcer. Or, concrètement, cette continuité fluidique semble difficile à garantir, et nécessite des solutions chères et complexes (usinage de doigts dans l'insert poreux pénétrant dans les rainures), et aléatoire.

[0067] Par conséquent, il existe un besoin pour améliorer encore les caloducs à rainures, en particulier réentrantes, et ce afin de pallier les inconvénients précités, notamment la résistance thermique élevée à l'évaporateur et la limitation du flux thermique radial à l'évaporateur, typiquement de l'ordre de 15 W/cm^2 pour un caloduc rempli d'ammoniac.

[0068] Le but général de l'invention est alors de répondre au moins en partie à ce besoin.

Exposé de l'invention

[0069] 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 échauffée 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 au moins 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(s) canal(ux) vapeur(s) et le(s) canal(ux) liquide(s), chaque zone d'échange comprenant au moins un canal de liaison débouchant.

[0070] Selon l'invention, au moins une partie des canaux de liaison débouchant de l'évaporateur logeant chacun un insert en matériau poreux qui s'étend au moins en

partie dans le(s) canal(ux) liquide(s) et dans le(s) canal(ux) vapeur, l'insert poreux étant adapté pour amener par capillarité le liquide depuis le(s) canal(ux) liquide(s) jusqu'au(x) canal(ux) vapeur dans lequel(lesquels) il s'évapore.

- [0071] 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(s) canal(ux) vapeur(s) et le(s) canal(ux) liquide(s), chaque zone d'échange comprenant au moins un canal de liaison débouchant, au moins une partie des canaux de liaison débouchant du condenseur logeant chacun un insert en matériau poreux qui s'étend au moins en partie dans le(s) canal(ux) liquide(s) et dans le(s) canal(ux) vapeur, l'insert poreux étant adapté pour condenser la vapeur dans le(s) canal(ux) vapeur et amener par capillarité le liquide condensé vers le canal liquide.
- [0072] Les inserts poreux à l'évaporateur peuvent être réalisés dans le même matériau constitutif, avoir la même forme et/ou les mêmes dimensions que les inserts poreux au condenseur.
- [0073] Selon une autre configuration avantageuse, la zone adiabatique du caloduc comprend au moins une zone d'échange entre le(s) canal(ux) vapeur(s) et le(s) canal(ux) liquide(s), 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, chaque zone d'échange comprenant au moins un canal de liaison débouchant exempt d'insert.
- [0074] On peut combiner ces deux configurations et donc avoir des inserts poreux dans l'évaporateur et dans le condenseur du caloduc tout en ayant une zone adiabatique exempte d'inserts poreux. De préférence, les canaux liquides sont présents dans toutes les zones du caloduc (évaporateur, zone adiabatique, condenseur), afin de minimiser la perte de pression du retour de liquide.
- [0075] Avantageusement, l'insert poreux de l'évaporateur et le cas échéant du condenseur s'étend(ent) sur toute la largeur du canal vapeur selon la troisième direction (Y).
- [0076] Avantageusement encore, l'insert poreux de l'évaporateur et le cas échéant du condenseur s'étend(ent) sur toute la largeur du canal liquide selon la troisième direction (Y).
- [0077] Selon une variante de réalisation avantageuse, l'insert poreux a la forme d'une feuille plane.
- [0078] Selon un mode de réalisation avantageux, au moins une partie des plaques intercalaires comprend, dans l'évaporateur et le cas échéant dans le condenseur, au moins une encoche longitudinale s'étendant selon la première direction (X) formant une surface d'appui et de maintien de la feuille plane poreuse.
- [0079] De préférence, le matériau constitutif d'un insert poreux est à base de graphite, de

préférence non mouillable par un métal d'apport pour brasage. Un tel matériau a pour avantage d'avoir une porosité et une conductivité thermique élevées, une masse volumique faible et est légèrement compressible. De plus, il n'est pas mouillable par l'alliage eutectique d'aluminium lors d'un procédé d'assemblage des plaques de l'empilement par brasure eutectique. A contrario, il est parfaitement mouillable avec l'ammoniac, qui est un fluide référence pour le remplissage de l'enceinte du caloduc. On peut citer par exemple les feuilles de graphite commercialisées sous la dénomination SIGRACET® ou encore celle sous la dénomination AvCarb®.

- [0080] De préférence, la largeur d'un insert poreux est comprise entre 0,1 et 1mm, de préférence de l'ordre de 0,6mm. Cette largeur détermine son épaisseur et est avantageusement légèrement supérieure ou égale à la largeur des canaux de liaison, de manière à assurer une continuité de l'écoulement du liquide, et simplifier la réalisation des plaques intercalaires.
- [0081] De manière générale, l'insert poreux est compressible et légèrement plus épais que la largeur des canaux de liaison dans le plan YZ de sorte à assurer un bon calage dans les plaques intercalaires. Un bon calage permet un bon contact thermique avec les plaques et par là une conduction efficace de la chaleur entre l'entrée du flux de chaleur sur les plaques et la zone d'évaporation sur les faces de l'insert poreux dans le canal vapeur.
- [0082] Dans la configuration du cas où le condenseur loge également un ou plusieurs inserts poreux, le flux de chaleur s'applique entre les faces de chaque insert poreux dans le canal vapeur, et l'extraction du flux de chaleur se fait par les faces extérieures du caloduc.
- [0083] De préférence encore, la taille moyenne des pores d'un insert poreux est comprise entre 1 et 100 μm , de préférence de l'ordre de 50 μm .
- [0084] Le matériau constitutif des plaques formant l'enceinte étanche est de préférence choisi parmi l'aluminium, le cuivre, le nickel, ou un alliage à base d'au moins deux de ceux-ci. Le ou les matériaux utilisés pour la fabrication du caloduc sont choisis en fonction des contraintes de masse, d'assemblage, de la robustesse requise, de la compatibilité avec le fluide...
- [0085] La technique d'assemblage des tôles dépend du matériau.
- [0086] Par exemple, dans le cas de plaques en alliage d'aluminium, on peut utiliser la brasure sous vide avec tôles cladées, la brasure au bain de sel, la brasure sous gaz inerte, le soudage par ultrasons, la soudure laser, la soudure par friction-malaxage (« Friction Stir Welding » en langage anglo-saxon), le collage...
- [0087] Dans le cas de plaque en cuivre, en acier inoxydable ou en superalliage, on peut utiliser la soudure diffusion, la soudure laser, la brasure diffusion, le collage...
- [0088] Dans le cas de plaques en aciers inoxydables, super alliages, on peut utiliser la soudure diffusion, la soudure laser, la brasure diffusion, le collage...

- [0089] A titre d'exemple, l'assemblage de plaques en alliage d'aluminium est obtenu par brasure eutectique. On utilise de manière connue des plaques en alliage d'aluminium dont une ou les deux faces est ou sont revêtue(s) d'un alliage aluminium à plus bas point de fusion.
- [0090] Par exemple, on utilise une tôle en alliage de la série AA3xxxx à cœur, avec un revêtement avec un alliage eutectique de la série AA4xxxx comprenant du silicium à plus bas point de fusion. Le revêtement se fait typiquement par une technique de roll-bond. L'épaisseur totale des plaques est typiquement de 0,05 mm à 5 mm, avec un revêtement typiquement de 5% à 10% de l'épaisseur totale sur une ou les deux faces. En pressant à chaud deux plaques d'aluminium ainsi revêtues à une température supérieure à la température de fusion de l'eutectique, mais inférieure à la température de l'alliage à cœur, l'alliage eutectique en surface fond et forme un alliage de brasure d'assemblage étanche entre les deux plaques. Le brasage est réalisé de préférence sous pression grâce à un système de maintien mécanique, qui maintient en pression l'empilement pendant le brasage en four sous vide. Des découpes et/ou des pliages sont requis dans le procédé de fabrication pour alléger et/ou mettre en forme la structure. Ils sont de préférence réalisés après l'assemblage. Il est à noter que la découpe des fenêtres dans les plaques, par exemple les fenêtres centrales, est réalisée avant assemblage.
- [0091] Le procédé de réalisation d'un caloduc selon l'invention peut avantageusement consister en les étapes suivantes :
- [0092] Etape a/ : Des plaques en un matériau donné sont découpées suivant la forme extérieure souhaitée pour le caloduc. Les inserts poreux sont également découpés, avantageusement sous forme de feuilles planes.
- [0093] Etape b/ : Les plaques intercalaires sont structurées, par exemple par poinçonnage, usinage, découpe laser, par découpe au jet d'eau ou par gravure chimique traversante...afin de réaliser les fenêtres spécifiques dans les différentes plaques, de sorte qu'une fois assemblées un caloduc à rainures réentrantes soit formé.
- [0094] Etape c/ : Les plaques sont ensuite empilées dans un ordre donné, en alternant entre deux plaques intercalaires un insert poreux à l'évaporateur et le cas échéant au condenseur. Puis deux plaques de fermeture sont disposées aux extrémités de l'empilement pour fermer le ou les canaux. L'empilement est réalisé de sorte à ce qu'un insert poreux soit pris en sandwich entre deux plaques intercalaires ou entre une plaque intercalaire et une plaque de fermeture, de préférence en étant comprimé. Eventuellement des canaux de refroidissement sont prévus sur une ou les deux faces de l'empilement.
- [0095] Etape d/ : Les plaques sont alors assemblées entre elles selon une technique d'assemblage choisie en fonction du ou des matériaux des plaques, par exemple

soudage, brasage, collage...L'assemblage final des plaques est étanche. Le ou les matériaux des plaques est ou sont choisis en fonction du fluide de travail, qui est lui-même choisi en fonction des spécifications de thermalisation du système à réaliser.

- [0096] Etape e/ : Le caloduc est ensuite rempli. Afin de remplir le caloduc du fluide de travail, on peut utiliser un queusot de remplissage inséré sur la tranche de l'enceinte. On peut également utiliser un queusot fixé sur un orifice ménagé à travers l'une ou l'autre des plaques de fermeture, et perpendiculairement à celle-ci. Le fluide est choisi en fonction des conditions de fonctionnement du caloduc (température de fonctionnement...) et de la compatibilité avec le ou les matériaux du caloduc.
- [0097] Selon une ou plusieurs caractéristiques avantageuses qui peuvent être combinées entre elles :
- [0098] - les plaques intercalaires présentent une épaisseur comprise entre 0,5 à 6mm, de préférence de l'ordre de 2mm,
- [0099] - les plaques de fermeture présentent une épaisseur comprise entre 1 et 3mm, de préférence de l'ordre de 2mm,
- [0100] - la largeur dans le plan YZ d'un canal de liaison est comprise entre 0,1 et 1mm, de préférence de l'ordre de 0,2mm,
- [0101] - l'épaisseur de structuration dans le plan YZ délimitant l'espace entre deux canaux de liaison adjacents est comprise entre 0,2 et 2mm, de préférence de l'ordre de 0,4mm,
- [0102] - la largeur dans le plan YZ d'un canal liquide est comprise entre 0,5 et 4mm, de préférence de l'ordre de 3mm.
- [0103] 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. De préférence, le caloduc comprend un canal vapeur unique central agencé entre n canaux liquides répartis latéralement de part et d'autre du canal vapeur.
- [0104] Selon une variante de réalisation avantageuse, au moins une des plaques d'extrémité présente une surface supérieure à celle des plaques intermédiaires dans une direction transversale à celle (Z) de l'empilement de sorte à former des diffuseurs thermiques. Avec de tels diffuseurs thermiques, le flux de chaleur entrant et sortant du caloduc est étalé sur une plus grande surface et réduit localement la densité de flux maximale qui serait atteinte sans diffuseur .
- [0105] Selon une autre variante de réalisation avantageuse, la section transversale dans le plan XY de l'évaporateur intégrant l'insert poreux et/ou celle du condenseur, de préférence rectangulaire, est supérieure à celle de la zone adiabatique du caloduc. Dans le cas d'un flux de chaleur perpendiculaire au plan principal des plaques, cette variante permet d'augmenter la surface d'échange à l'évaporateur et/ou au condenseur et donc minimiser les résistances thermiques externes, tout en limitant l'augmentation de

masse du caloduc.

- [0106] Dans le cas d'un flux de chaleur parallèle au plan des plaques, la taille des canaux liquides et/ou vapeur dans le plan YZ peut être augmentée, permettant d'augmenter la limite capillaire du caloduc.
- [0107] En cas d'absence de canaux liquides sous un insert poreux, mais uniquement un retour capillaire du liquide dans l'insert poreux, il est préférable d'augmenter la largeur d'un insert poreux dans la zone liquide, afin de limiter les pertes de pression dans celui-ci.
- [0108] Selon encore une autre variante de réalisation avantageuse les structurations de l'évaporateur et le cas échéant du condenseur comprennent une pluralité de plots répartis, de préférence uniformément, le long de la première direction (X). Ces plots permettent de minimiser la perte de pression dans un insert poreux, tout en assurant un maintien mécanique de ce dernier. Cette variante avec plots peut être réalisée pour des configurations avec canaux liquides sur les côtés de l'enceinte du caloduc ou dans la partie centrale de celle-ci.
- [0109] Selon un mode de réalisation avantageux, le caloduc comprend des moyens d'échange thermique au niveau de la première extrémité et/ou deuxième extrémité, les moyens d'échange thermique au niveau de la deuxième extrémité comportant avantageusement une ou plusieurs ailettes en contact thermique avec au moins une des plaques de fermeture.
- [0110] Selon ce mode, les moyens d'échange thermique peuvent comprendre un circuit fluide en contact thermique avec au moins une des plaques de fermeture, ledit circuit étant formé par une plaque structurée de sorte à délimiter des canaux, lesdits canaux étant fermés par ladite plaque de fermeture et une plaque de fermeture supplémentaire, les moyens d'échange thermique comportant également des moyens pour alimenter en fluide caloporteur ledit circuit fluide.
- [0111] De manière générale, on peut intégrer au sein même du caloduc au niveau de l'évaporateur et/ou du condenseur un circuit fluide formant la source chaude et/ou la source froide. Ce circuit prendra la forme d'une tôle de fermeture plissée ou ajourée afin de former un radiateur à air intégral. Alternativement, il peut prendre la forme d'un circuit liquide ou diphasique formant la source chaude et/ou froide.
- [0112] 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.
- [0113] Selon une variante de réalisation, des découpes des canaux de liaison étroits peuvent être réalisées droites, ou avec une forme ondulée ou en dent de scie sur tout ou partie de la longueur des canaux. Une telle forme permet d'obtenir des parois non mouillées par le film de condensation, dans le condenseur du caloduc, aux sommets des on-

dulations ou dents de scie. Cela permet également d'augmenter le coefficient d'échange en condensation en minimisant la résistance d'interface du film de condensation.

- [0114] L'invention a également pour objet un système comprenant :
- [0115] - une source froide (SF) ;
- [0116] - une source chaude (SC) et
- [0117] - au moins un caloduc à rainures réentrantes tel que décrit précédemment, le caloduc étant agencé de sorte que le flux de chaleur (\diamond_E) de la source chaude (SC) sur l'évaporateur soit 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) est 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).
- [0118] Un même caloduc selon l'invention peut être mis en oeuvre pour réaliser un contrôle thermique, un transfert de chaleur, un refroidissement de composant... La source de chaleur peut donc être par exemple un composant électrique ou électronique, un stockage de chaleur, un réacteur chimique exothermique, les puits de chaleur d'ailettes en convection forcée, des plaques froides en écoulement mono ou diphasique, un stockage de froid, une réaction chimique endothermique...
- [0119] La source froide peut être constituée d'un radiateur en convection naturelle ou forcée.
- [0120] On peut envisager différentes technologies de radiateur : ailettes plissées, ailettes extrudées, ailettes skivées, ailettes picots, ailettes moulées, ailettes fixées par moletage, ailettes réalisées par impression 3D, ou toute autre ailette obtenue par une technique de réalisation d'extension de surface connue de l'homme de l'art. Un ou des radiateurs à ailettes tels que décrits ci-dessus peuvent être mis en oeuvre dans un caloduc selon l'invention, monocanal ou multicanaux droit ou présentant toute autre forme. Ainsi, l'invention consiste essentiellement à proposer un caloduc dont au moins l'évaporateur intègre en son sein un insert poreux qui s'étend dans un canal de liaison entre canal vapeur et canal(ux) liquide(s).
- [0121] 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. Les inserts poreux selon l'invention ne modifient pas le process d'assemblage, puisqu'ils s'intercalent directement en alternance avec les plaques dans l'empilement qui est assemblé.
- [0122] L'invention trouve particulièrement une application dans le domaine spatial.
- [0123] Pour un caloduc configuré pour une application dans le domaine spatial, les

contraintes rencontrées sont de plusieurs types qui peuvent être énumérés comme suit :

- [0124] - à l'évaporateur, généralement de faible longueur, il est requis des flux radiaux élevés à cause des composants électroniques que l'on cherche à refroidir, dont les densités de puissance ne cessent d'augmenter. De plus, il faut une résistance thermique faible et, afin d'assurer une pression motrice au caloduc, il faut une pression capillaire élevée assurée par un faible rayon capillaire à l'interface liquide/vapeur ;
- [0125] - dans la zone adiabatique, généralement de grande longueur, il faut limiter les pertes de pression dans le canal vapeur et dans les canaux liquides, afin d'avoir une limite capillaire de transport de chaleur axiale élevée.
- [0126] - au condenseur, qui peut être également de grande longueur, il faut également limiter les pertes de pression, mais aussi assurer une condensation efficace pour minimiser la résistance thermique dans cette zone.
- [0127] L'invention décrite ici permet de répondre à ces contraintes, en permettant des configurations différentes dans chaque zone de caloduc afin de l'optimiser au mieux suivant les critères de performance recherchés.
- [0128] Plus particulièrement, les inserts poreux insérés longitudinalement dans l'évaporateur du caloduc, vont permettre de transporter par capillarité le liquide entre le(s) canal(ux) liquide(s) et le canal vapeur. L'évaporation du liquide en surface d'un insert poreux permet l'obtention d'une pression capillaire élevée, tout en assurant un flux de chaleur surfacique plus élevé qu'un caloduc à rainures réentrantes ou à capillaire fritté, selon l'état de l'art.
- [0129] Par exemple, la limite pratique de flux thermique surfacique avec un caloduc rempli d'ammoniac, à rainures réentrantes selon l'état de l'art est de l'ordre de 15 W/cm². Avec un caloduc selon l'invention, cette limite pratique peut monter à plus de 50 W/cm².
- [0130] La résistance thermique est également améliorée dans l'évaporateur grâce à une plus grande surface d'évaporation du liquide.
- [0131] Dans les zones évaporateur et éventuellement condenseur, il existe des canaux liquides, la circulation de liquide dans le poreux se faisant uniquement sur les petites distances entre canal liquide et canal vapeur, permettant de limiter les pertes de charges dans le poreux.
- [0132] Dans la zone adiabatique, il n'y a pas de poreux, des rainures longitudinales définissant les canaux de liaison permettent quant à eux de minimiser la perte de pression du liquide, même sur de grandes distances.
- [0133] Le fait d'agencer également des inserts poreux longitudinalement dans le condenseur permet de réduire la résistance thermique dans cette zone, même si cela peut se faire au détriment d'une perte de charge liquide augmentée dans cette zone.
- [0134] En outre, un caloduc selon l'invention présente une pression capillaire élevée grâce à

la faible taille des pores d'un insert poreux. Et donc, il est susceptible de fonctionner sans gravité, voire même contre la gravité. Cela rend le caloduc selon l'invention particulièrement adapté pour des missions spatiales à proximité d'objets célestes où il peut exister une gravité non nulle (lune, mars, astéroïdes...). 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

- [0135] [Fig.1] la [Fig.1] illustre la courbe délimitant le domaine de fonctionnement pour un exemple de caloduc à pompage capillaire.
- [0136] [Fig.2] la [Fig.2] est une représentation symbolique d'un réseau de résistances thermiques qui s'établissent pour un caloduc.
- [0137] [Fig.3] la [Fig.3] est une vue schématique d'un caloduc à artère selon l'état de l'art (Exemple1).
- [0138] [Fig.3A], [Fig.3B] les figures 3A et 3B sont des vues en coupe transversale de la [Fig.3], respectivement au niveau de l'évaporateur et du condenseur du caloduc à artère selon l'état de l'art (Exemple 1).
- [0139] [Fig.4] la [Fig.4] est une vue en coupe transversale d'une variante de caloduc à artères selon l'état de l'art.
- [0140] [Fig.5] la [Fig.5] est une reproduction photographique d'un exemple de caloduc à rainures réentrantes à section transversale en Omega selon l'état de l'art (Exemple 1).
- [0141] [Fig.6] la [Fig.6] est une vue schématique de côté d'un caloduc à rainures réentrantes, selon l'état de l'art (Exemple 2).
- [0142] [Fig.7] la [Fig.7] est une vue en perspective et coupe transversale de la [Fig.6], au niveau de l'évaporateur du caloduc à rainures réentrantes selon la demande de brevet EP3553445 (Exemple 2).
- [0143] [Fig.8] la [Fig.8] est une vue de détail et en coupe transversale de la [Fig.7].
- [0144] [Fig.9] la [Fig.9] est une vue en éclaté d'un caloduc à rainures réentrantes à canaux de liaison transversaux réalisé par empilement de plaques métalliques assemblées, avec des inserts poreux à l'évaporateur, selon un troisième exemple de l'invention avec un rapport d'aspect de caloduc carré.
- [0145] [Fig.10] la [Fig.10] est une vue de détail et en coupe transversale de la [Fig.9], au niveau de l'évaporateur, selon le troisième exemple de l'invention.
- [0146] [Fig.11] la [Fig.11] est une vue de détail et en coupe transversale selon un troisième exemple de l'invention, au niveau du condenseur et de la zone adiabatique du caloduc.
- [0147] [Fig.12] la [Fig.12] est une vue de détail et en 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 un quatrième exemple

de l'invention, avec un rapport d'aspect du caloduc rectangulaire plat.

- [0148] [Fig.13] la [Fig.13] est une vue en éclaté d'un caloduc à rainures réentrantes à canaux de liaison transversaux réalisé par empilement de plaques métalliques assemblées selon un cinquième exemple de l'invention.
- [0149] [Fig.14] la [Fig.14] est une vue de détail et en coupe transversale de la [Fig.13], au niveau de l'évaporateur selon le cinquième exemple de l'invention.
- [0150] [Fig.15] la [Fig.15] est une est une vue de détail et en coupe transversale, au niveau du condenseur et de la zone adiabatique du caloduc selon le cinquième exemple de l'invention.
- [0151] [Fig.16] la [Fig.16] est une vue de détail et en 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 un sixième exemple de l'invention.
- [0152] [Fig.17] la [Fig.17] illustre sous forme de courbes les limites capillaires des différents exemples de caloducs selon l'état de l'art et selon l'invention.
- [0153] [Fig.18] la [Fig.18] est une vue en éclaté d'un caloduc à rainures réentrantes à canaux de liaison transversaux réalisé par empilement de plaques métalliques assemblées selon un autre mode de réalisation de l'invention.
- [0154] [Fig.19] la [Fig.19] est une vue de détail et en coupe transversale de la [Fig.18], au niveau de l'évaporateur.
- [0155] [Fig.20] la [Fig.20] est une vue de détail et en coupe transversale de la [Fig.18], au niveau de la zone adiabatique du caloduc.
- [0156] [Fig.21] la [Fig.21] est une vue en perspective et de détail d'une variante de réalisation de l'évaporateur d'un caloduc selon l'invention, comprenant des diffuseurs de chaleur intégrés au niveau de l'évaporateur.
- [0157] [Fig.22] la [Fig.22] est une vue en perspective et en éclaté, de détail d'une autre variante de réalisation de l'évaporateur d'un caloduc selon l'invention.
- [0158] [Fig.23] la [Fig.23] est une vue en perspective et en éclaté, de détail d'une autre variante de réalisation de l'évaporateur d'un caloduc selon l'invention.
- [0159] [Fig.24], [Fig.25] les figures 24 et 25 sont des vues en perspectives d'autres exemples de réalisation des canaux de liaison au niveau de la fenêtre centrale avec des plaques intercalaires d'un caloduc selon l'invention.
- [0160] [Fig.26] la [Fig.26] est une vue en perspective d'un autre exemple de réalisation d'un caloduc selon l'invention agencé dans plusieurs plans.
- [0161] [Fig.27A], [Fig.27B], [Fig.27C], [Fig.27D], [Fig.27E], [Fig.27F], [Fig.27G], [Fig.27H] les figures 27A à 27H sont des vues en perspective d'exemples d'ailettes applicables à un caloduc selon l'invention.
- [0162] [Fig.28] la [Fig.28] est une vue éclatée d'un caloduc selon un exemple de réalisation

comportant un échangeur thermique au niveau du condenseur.

Description détaillée

- [0163] Les figures 1 à 4 ont déjà été commentées en préambule. Elles ne sont pas détaillées ci-après.
- [0164] Par souci de clarté, un même élément selon l'art antérieur et l'invention est désigné par la même référence numérique.
- [0165] 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. Φ_E désigne le flux de chaleur émis par la source chaude vers un caloduc, et Φ_S désigne le flux thermique émis par un caloduc vers une source froide.
- [0166] On décrit ci-après différents exemples de caloducs à rainures réentrantes selon l'état de l'art et selon l'invention afin de pouvoir comparer leurs performances, comme détaillés par la suite.
- [0167] On précise que pour tous ces exemples, les canaux liquides sont présents à la fois dans l'évaporateur et dans le condenseur.
- [0168] Tous les caloducs selon ces exemples présentent une même longueur totale, une même longueur d'évaporateur, une même longueur de la zone adiabatique, et une même longueur du condenseur.
- [0169] La section transversale externe définissant l'encombrement latéral de chaque caloduc selon ces exemples est égale à 13,2mm x 13,2mm.
- [0170] Exemple 1 (selon l'état de l'art) : le caloduc à rainures réentrantes 1 est obtenu par extrusion selon l'état de l'art avec des rainures réentrantes, tel que représenté sur la [Fig.5].
- [0171] L'évaporateur d'un tel caloduc 1, axisymétrique de forme générale cylindrique, comprend une paroi périphérique 10 dans laquelle sont réalisés une pluralité de canaux 11 à section transversale en forme générale d'Omega, régulièrement répartis angulairement et débouchant par l'intermédiaire d'un canal de liaison 12 sur un creux central cylindrique 13 dans lequel circule la phase vapeur. La paroi périphérique 10 est en contact avec une source chaude (SC).
- [0172] Exemple 2 (selon l'état de l'art) : Sur les figures 6 à 8, on peut voir un exemple de caloduc 1 à pompage capillaire à rainures réentrantes réalisé selon la demande de brevet EP3553445.
- [0173] Cet exemple de caloduc 1 à pompage capillaire s'étendant selon un axe longitudinal X est vu de l'extérieur sur la [Fig.6].
- [0174] 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 .

[0175] L'enceinte étanche 2 délimite intérieurement une zone adiabatique Z_A entre l'évaporateur et le condenseur.

[0176] 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...

[0177] 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.

[0178] Un module comprend au moins deux plaques intercalaires, les plaques des différents modules de plaques intermédiaires 20 comprenant des fenêtres ou d'autres structures, 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.

[0179] 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.

[0180] Un mode de réalisation préférentiel consiste à usiner des plaques 20 cladées 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 cladées.

[0181] 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...

[0182] 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.

[0183] 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.

- [0184] Par exemple, des fenêtres sont réalisées par poinçonnage, découpage, par exemple au laser ou au jet d'eau.
- [0185] 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).
- [0186] L'empilement de plaques 20 avec leurs fenêtres ou leurs structurations 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.
- [0187] 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 .
- [0188] 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 .
- [0189] Un canal de liaison 12 forme une rainure réentrant 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.
- [0190] Ainsi, dans l'état de l'art, comme illustré en figures 7 et 8, les canaux de liaison 12 s'étendent selon la direction longitudinale X du caloduc. Comme symbolisé sur la [Fig.8], 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 être présentes physiquement que sur un côté longitudinal des canaux liquides 11.
- [0191] 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.
- [0192] Les plaques d'extrémité 22 ont une épaisseur comprise entre 1 mm et 3 mm, de préférence égale à 2 mm.
- [0193] La largeur dans le plan YZ d'un canal de liaison 12 est comprise entre 0,1 et 1mm, de préférence de l'ordre de 0,2mm.

- [0194] La largeur dans le plan YZ d'un canal liquide 11 comprise entre 0,5 et 4mm, de préférence de l'ordre de 3mm.
- [0195] Exemple 3 (selon l'invention) : Dans cet exemple illustré aux figures 9 à 11, l'évaporateur comprend une pluralité d'inserts poreux 15 en graphite, chacun de préférence sous la forme d'une feuille plane.
- [0196] Un insert poreux 15 est en appui à l'intérieur d'une encoche longitudinale 16 prévue à cet effet dans une plaque intercalaire 20.
- [0197] L'empilement des plaques intercalaires 20 est réalisé en alternant entre deux plaques intercalaires un insert poreux 15 à l'évaporateur Z_E . Puis, les deux plaques de fermeture 22 sont disposées aux extrémités de l'empilement pour fermer le ou les canaux 11, 12, 13. L'empilement est réalisé de sorte à ce qu'un insert poreux 15 soit pris en sandwich entre deux plaques intercalaires 20 ou entre une plaque intercalaire 20 et une plaque de fermeture 22 en étant compressé.
- [0198] Dans cet exemple 3, l'insert poreux 15 s'étend à travers toute la largeur selon la direction Y à la fois des canaux liquide 11, de liaison 12 et vapeur 13. L'insert poreux 15 permet par capillarité d'amener le liquide de chaque canal liquide 11 vers le canal vapeur 13 où il s'évapore en surface.
- [0199] La zone adiabatique Z_A et le condenseur Z_C sont exempts d'inserts.
- [0200] Le flux de chaleur Φ_E provenant de la source chaude parvient sur la face latérale 23 de l'enveloppe 2 du caloduc, c'est-à-dire en étant parallèle au plan des plaques 20, 22 et les canaux liquides 11 sont donc à l'opposé de la face 23.
- [0201] Dans cet exemple 3, le fait d'avoir plusieurs canaux 11 en parallèle permet d'augmenter le flux de chaleur transmis et/ou la surface d'échange. Dans cet exemple 3, le retour du liquide se fait donc sur le côté opposé à celui 23 par laquelle le flux de chaleur Φ_E est apporté, ce qui repousse l'apparition de bulles dans les canaux liquides 11 (limite d'ébullition).
- [0202] Au condenseur Z_C , le flux de chaleur Φ_S est extrait par la face latérale 24, c'est-à-dire celle du côté des canaux liquides 11. On peut aussi envisager une extraction de chaleur sur la face 23 côté canal vapeur, voire sur les autres côtés du caloduc.
- [0203] Exemple 4 (selon l'invention) : Cet exemple illustré à la [Fig.12] est identique à l'exemple 3 à ceci près que le rapport d'aspect entre la largeur et la hauteur du caloduc est différent de manière à avoir un caloduc plus plat.
- [0204] Exemple 5 (selon l'invention) : Dans cet exemple illustré aux figures 13 à 15, l'évaporateur comprend également une pluralité d'inserts poreux 15 en graphite, chacun de préférence sous la forme d'une feuille plane.
- [0205] Un insert poreux 15 est en appui à l'intérieur d'une encoche longitudinale 16 prévue à cet effet dans une plaque intercalaire 20.
- [0206] L'empilement des plaques intercalaires 20 est réalisé en alternant entre deux plaques

intercalaires un insert poreux 15 à l'évaporateur Z_E . Puis, les deux plaques de fermeture 22 sont disposées aux extrémités de l'empilement pour fermer le ou les canaux 11, 12, 13. L'empilement est réalisé de sorte à ce qu'un insert poreux 15 soit pris en sandwich entre deux plaques intercalaires 20 ou entre une plaque intercalaire 20 et une plaque de fermeture 22 en étant comprimé.

- [0207] Dans cet exemple 5, l'insert poreux 15 s'étend à travers toute la largeur selon la direction Y à la fois des canaux liquides 11, de liaison 12 et vapeur 13. Pour maintenir encore mieux l'insert poreux 15, on peut envisager une encoche longitudinale prévue à cet effet sur le bord extérieur des canaux liquides 11.
- [0208] Ici, chaque extrémité latérale d'un insert poreux 15 selon la direction Y est au-dessus d'un canal liquide 11. Autrement dit, deux canaux liquides 11 sont agencés symétriquement de part et d'autre du canal vapeur 13 à l'intérieur duquel s'étendent les inserts poreux 15 en étant parallèles les uns aux autres.
- [0209] La zone adiabatique Z_A et le condenseur Z_C sont exempts d'inserts et sont donc identiques à ceux de l'exemple 2 selon l'état de l'art.
- [0210] Le flux de chaleur Φ_E provenant de la source chaude parvient sur la face latérale 21 de l'enceinte 2 du caloduc en étant perpendiculaire au plan des plaques 20, 22.
- [0211] Au condenseur Z_C , le flux de chaleur Φ_S est extrait par les faces latérales 23 ou 24. On peut aussi envisager une extraction par la face latérale 21 ou celle en regard.
- [0212] Exemple 6 (selon l'invention) : Dans cet exemple illustré à la [Fig.16], l'évaporateur comprend également une pluralité d'inserts poreux 15 en graphite, chacun de préférence sous la forme d'une feuille plane.
- [0213] Un insert poreux 15 est en appui à l'intérieur d'une encoche longitudinale 16 prévue à cet effet dans une plaque intercalaire 20.
- [0214] L'empilement des plaques intercalaires 20 est réalisé en alternant entre deux plaques intercalaires un insert poreux 15 à l'évaporateur Z_E . Puis, les deux plaques de fermeture 22 sont disposées aux extrémités de l'empilement pour fermer le ou les canaux 11, 12, 13. L'empilement est réalisé de sorte à ce qu'un insert poreux 15 soit pris en sandwich entre deux plaques intercalaires 20 ou entre une plaque intercalaire 20 et une plaque de fermeture 22 en étant comprimé.
- [0215] Dans cet exemple 6, l'insert poreux 15 s'étend à travers toute la largeur selon la direction Y à la fois des canaux liquides 11, de liaison 12 et vapeur 13.
- [0216] Ici, la partie centrale d'un insert poreux 15 selon la direction Y est au-dessus d'un unique canal liquide 11 qui est central et qui est relié à deux canaux vapeur 13 de part et d'autre par l'intermédiaire d'un canal de liaison 12.
- [0217] L'insert poreux 15 permet par capillarité d'amener le liquide du canal central 11 vers les deux canaux vapeur 13 où il s'évapore en surface.
- [0218] La zone adiabatique Z_A et le condenseur Z_C sont exempts d'inserts.

- [0219] Le flux de chaleur Φ_E provenant de la source chaude parvient sur les deux faces latérales 23, 24 de l'enceinte 2 du caloduc en étant parallèle au plan des plaques 20, 22. Les canaux liquides centraux 11 sont donc éloignés des faces 23, 24 où arrivent les flux de chaleur et ont donc un risque réduit d'avoir une ébullition en leur sein.
- [0220] Au condenseur Z_C , le flux de chaleur Φ_S peut être extrait par n'importe quelle face latérale 21, 23, 24 de l'enceinte 2 du caloduc.
- [0221] Les performances des exemples 1 et 2 selon l'état de l'art sont comparées avec celles des exemples 3 à 6 selon l'invention.
- [0222] Les critères de comparaison choisis sont respectivement la limite capillaire, la limite d'ébullition, la résistance thermique à l'évaporateur, comme énoncées dans la publication [3].
- [0223] La limite capillaire peut être définie comme la puissance limite déterminée par l'écart entre la pression motrice à l'interface liquide/vapeur à l'évaporateur et les pertes de pression des phases liquide et vapeur migrant inversement dans le caloduc. Cette limite est calculée à l'aide de modèles thermo hydrauliques, et calculée en valeur absolue et en relatif par rapport au caloduc de l'exemple 1 selon l'état de l'art (caloduc cylindrique à rainures réentrantes).
- [0224] La limite d'ébullition peut quant à elle être définie comme étant le flux au-delà duquel des bulles peuvent naître dans les rainures et nuire au mouvement du liquide dans celle-ci. Cette limite peut être évaluée en calculant à l'aide d'un modèle aux éléments finis la surchauffe maximum dans les rainures, et est exprimée en relatif par rapport à la surchauffe dans le caloduc de l'exemple 1 selon l'état de l'art (caloduc cylindrique à rainures réentrantes).
- [0225] Enfin, la résistance thermique à l'évaporateur R peut être évaluée par la formule suivante :
- [0226] $R = (t_{\text{semelle}} - t_{\text{vapeur}}) / \text{flux}$
- [0227] Dans laquelle t_{semelle} : température moyenne de la paroi sur laquelle on applique le flux de chaleur ($^{\circ}\text{C}$)
- [0228] t_{vapeur} : température de la vapeur du caloduc ($^{\circ}\text{C}$)
- [0229] flux : flux de chaleur sur la semelle (W/m^2).
- [0230] On donnera également cette valeur en relatif par rapport à l'exemple 1 selon l'état de l'art (caloduc cylindrique à rainures réentrantes).
- [0231] La [Fig.17] illustre sous formes de courbes de limite capillaire les différents exemples en fonction de la température du caloduc.
- [0232] Le tableau 1 ci-dessous résume les gains en termes de limite capillaire, limite d'ébullition et résistance thermique à l'évaporateur des différents exemples de caloducs par rapport au caloduc de l'exemple 1 selon l'état de l'art (caloduc cylindrique à rainures réentrantes) dont les valeurs de référence sont égales à 1. On

précise que les valeurs indiquées ont été calculées pour une température adiabatique de 60°C.

[0233] [Tableaux1]

Exemples	1 (Etat de l'art)	2 (Etat de l'art)	3 (Invention)	4 (Invention)	5 (Invention)	6 (Invention)
Gains						
limite capillaire	1	3,9	3,4	4,7	4,0	3,1
limite d'ébullition	1	1,3	4,8	4,3	2,3	6,9
résistance thermique à l'évaporateur	1	1,3	2,7	2,7	2,0	3,1

[0234] De ce tableau, il ressort que quel que soit l'exemple selon l'invention, tous les paramètres mesurant la performance sont significativement augmentés par rapport aux exemples 1 et 2 selon l'état de l'art. L'exemple 6 selon l'invention présente les meilleures performances.

[0235] Un autre mode de réalisation de l'invention est illustré aux figures 18 à 20.

[0236] Dans cet autre mode, l'évaporateur Z_E comprend une pluralité d'inserts poreux 15 en graphite, chacun de préférence sous la forme d'une feuille plane.

[0237] Un insert poreux 15 est en appui à l'intérieur d'une encoche longitudinale 16 prévue à cet effet dans une plaque intercalaire 20.

[0238] Le condenseur Z_C comprend également une pluralité d'inserts poreux 17 en graphite, chacun de préférence sous la forme d'une feuille plane, comme montré sur la [Fig.18]. Le matériau constitutif des inserts poreux 17 peut être le même que celui des inserts poreux 15.

[0239] L'empilement des plaques intercalaires 20 est réalisé en alternant entre deux plaques intercalaires un insert poreux 15 à l'évaporateur Z_E , et un insert poreux 17 au condenseur Z_C . Puis, les deux plaques de fermeture 22 sont disposées aux extrémités de l'empilement pour fermer le ou les canaux 11, 12, 13. L'empilement est réalisé de sorte à ce qu'un insert poreux 15 et un insert poreux 17 soient pris en sandwich entre deux plaques intercalaires 20 ou entre une plaque intercalaire 20 et une plaque de fermeture 22 en étant comprimés.

[0240] Dans cet autre mode, l'insert poreux 15 et l'insert poreux 17 s'étendent à travers toute la largeur selon la direction Y à la fois des canaux liquide 11, de liaison 12 et vapeur 13.

- [0241] Ici, la partie centrale d'un insert poreux 15 ou d'un insert poreux 17 selon la direction Y est au-dessus d'un unique canal liquide 11 qui est central et qui est relié à deux canaux vapeur 13 de part et d'autre par l'intermédiaire d'un canal de liaison 12.
- [0242] L'insert poreux 15 permet par capillarité d'amener le liquide du canal central 11 vers les deux canaux vapeur 13 où il s'évapore en surface.
- [0243] La zone adiabatique Z_A est quant à elle exempte d'inserts.
- [0244] Cet autre mode est avantageux par rapport aux exemples 3 à 6 précités car même si la limite capillaire est diminuée, il permet d'améliorer la résistance thermique au condenseur Z_C .
- [0245] La [Fig.21] illustre une variante avantageuse selon laquelle les plaques de fermeture 22 d'un empilement définissant une enceinte de caloduc selon l'invention, sont de plus grande surface dans le plan XY, afin de les utiliser comme diffuseurs thermiques pour étaler le flux de chaleur sur une zone plus large, au niveau de l'évaporateur et/ou du condenseur.
- [0246] Dans le cadre de l'invention, on peut réaliser un caloduc plus ou moins large suivant les zones évaporateur, adiabatique et condenseur, ce qui permet d'optimiser la masse du caloduc.
- [0247] Dans le cas d'un flux perpendiculaire aux plaques 20, 22, cela permet d'augmenter la surface d'échange à l'évaporateur, et/ou au condenseur et donc minimiser les résistances thermiques externes.
- [0248] Dans le cas d'un flux de chaleur parallèle au plan des plaques 20, 22, la taille des canaux liquides et/ou vapeur est augmentée, permettant d'augmenter la limite capillaire du caloduc.
- [0249] En l'absence de canaux liquides 11 sous un insert poreux 15 ou 17, et donc avec un retour capillaire du liquide uniquement dans ledit insert 15 ou 17, il est préférable d'augmenter la largeur de l'insert poreux 15 là où se trouvent les canaux liquides 11, afin de limiter les pertes de pression dans celui-ci, comme illustré à la [Fig.22].
- [0250] La [Fig.23] illustre une variante avantageuse dans laquelle les structurations 14 de l'évaporateur et le cas échéant du condenseur comprennent une pluralité de plots 18 répartis uniformément dans les canaux de liaison 12 le long de la direction (X). Ces plots 18 permettent d'assurer un maintien mécanique de l'insert poreux. La présence de ces plots 18 peut être réalisée pour les exemples avec canaux liquides sur les côtés ou centraux comme sur cette [Fig.23].
- [0251] Les découpes des canaux de liaison 12 peuvent être réalisées droites, ou avec une forme ondulée ([Fig.24]) ou en dent de scie ([Fig.25]) sur tout ou partie de la longueur des canaux.
- [0252] Cette forme réalisée au condenseur ZC permet d'obtenir des parois non mouillées par le film de condensation aux sommets soit des ondulations soit des dents de scie. Cela

permet également d'augmenter le coefficient d'échange en condensation en minimisant la résistance d'interface du film de condensation.

- [0253] Un caloduc selon l'invention peut être rectiligne ou agencé dans différents plans. Il est possible de réaliser un ou plusieurs changements de direction par la forme des plaques 20, 22 et/ou des pliages sur l'enceinte 2 afin de se conformer à l'application pour laquelle le caloduc est destiné. Les pliages peuvent être faits dans un ou plusieurs plans suivant les besoins, à un angle de pliage quelconque.
- [0254] Une limitation au pliage proviendrait d'un rayon de pliage trop faible comparé à l'épaisseur du caloduc qui pourrait conduire à l'écrasement des canaux lors du pliage, et au délaminage des plaques assemblées ensemble.
- [0255] Il n'est par ailleurs pas possible de plier le caloduc dans la zone évaporateur, du fait de la fragilité des inserts poreux 15.
- [0256] La [Fig.26] illustre une telle variante avec un caloduc comprenant une partie rectiligne 25 intégrant le condenseur ZC du caloduc et une autre partie rectiligne 26, coudée à 90° de la partie rectiligne 25, qui intègre sur une partie de sa longueur l'évaporateur Z_E. La zone adiabatique s'étend donc dans les deux parties rectilignes 25, 26 à 90° l'une de l'autre.
- [0257] Cette [Fig.26] montre également la présence d'ailettes 27 formant un radiateur au condenseur ZC.
- [0258] Elle montre enfin la présence d'un queusot de remplissage 28 qui permet de remplir le caloduc avec le fluide de travail. Le queusot de remplissage peut être fixé sur un orifice ménagé sur les plaques de fermeture 22, et perpendiculairement à celle-ci.
- [0259] Les figures 27A à 27H illustrent différentes formes d'ailettes qui peuvent être utilisées en tant que radiateur, à savoir des ailettes droites extrudées, des ailettes skivées, des ailettes plissées : droites à section rectangulaire, à section triangulaire, ondulées, de type OSF, droites perforées, à persienne.
- [0260] On peut intégrer directement dans un caloduc un circuit liquide ou diphasique en tant source chaude et/ou froide.
- [0261] La [Fig.28] illustre une telle intégration : un circuit de refroidissement 30 dans lequel est destiné à circuler un fluide caloporteur est directement en contact avec le condenseur. Dans l'exemple représenté, le circuit de refroidissement 30 est formé par une plaque supplémentaire 31, dans laquelle sont réalisées des rainures 32 définissant les parois latérales du circuit, et la plaque de fermeture 22 et une plaque de fermeture supplémentaire 22 forment les parois d'extrémité du circuit de refroidissement. La plaque de fermeture 22 comporte deux orifices 29 débouchant chacun à une extrémité du circuit et permettant la circulation du fluide caloporteur.
- [0262] D'autres avantages et améliorations pourront être apportés sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

- [0263] 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.
- [0264] Toutes les variantes peuvent être combinées ou non entre elles : on peut par exemple avoir des rainures longitudinales non débouchantes 16 combinées 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 de brasage à l'interface entre plaques 20 ou 20, 22.
- [0265] 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.
- [0266] 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.
- [0267] A titre d'exemple, pour un caloduc selon l'invention réalisé en alliage d'aluminium en nickel, en cuivre 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 méthano.... Le fluide de remplissage privilégié est l'ammoniac (NH₃). Du fait des limites d'utilisation, entre les fluides de travail et les métaux cités, les couples envisagés peuvent être comme suit :

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

Liste des références citées

- [0268] [1]: Christine Hoa :«*Thermique des caloducs à rainures axiales : études et réalisations pour des applications spatiales*». Université de Poitiers, 2004.
- [0269] [2]: S. W. Chi, "Heat Pipe Theory and Practice," McGraw-Hill, NY, U.S.A., 1976.
- [0270] [3]: Jocelyn BONJOUR et al. « *Systèmes diphasiques de contrôle thermique - Thermosiphons et caloducs* » Technique de l'ingénieur, BE9545, 2015.

Revendications

- [Revendication 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 supérieur ou égal à 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 au moins 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(s) canal(ux) vapeur(s) et le(s) canal(ux) liquide(s), chaque zone d'échange comprenant au moins un canal de liaison débouchant (12), au moins une partie des canaux de liaison débouchant (12) de l'évaporateur logeant chacun un insert en matériau poreux (15) qui s'étend au moins en partie dans le(s) canal(ux) liquide(s) et dans le(s) canal(ux) vapeur(s), l'insert poreux étant adapté pour amener par capillarité le liquide depuis le(s) canal(ux) liquide(s) jusqu'au(x) canal(ux) vapeur dans lequel(lesquels) il s'évapore.
- [Revendication 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(s) canal(ux) vapeur(s) et le(s) canal(ux) liquide(s), chaque zone d'échange comprenant au moins un canal de liaison débouchant (12), au moins une partie des canaux de liaison débouchant (12) du condenseur logeant chacun un insert en matériau poreux (17) qui s'étend au moins en partie dans le(s) canal(ux) liquide(s) et dans le(s) canal(ux) vapeur, l'insert poreux étant adapté pour condenser la vapeur dans le canal vapeur et amener par capillarité le liquide condensé vers le canal liquide.

- [Revendication 3] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, la zone adiabatique du caloduc comprenant au moins une zone d'échange entre le(s) canal(ux) vapeur(s) et le(s) canal(ux) liquide(s), 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, chaque zone d'échange comprenant au moins un canal de liaison débouchant (12) exempt d'insert.
- [Revendication 4] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, l'insert poreux de l'évaporateur et le cas échéant du condenseur s'étendant sur toute la largeur du canal vapeur selon la troisième direction (Y).
- [Revendication 5] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, l'insert poreux ayant la forme d'une feuille plane.
- [Revendication 6] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon la revendication 5, au moins une partie des plaques intercalaires comprenant, dans l'évaporateur et le cas échéant dans le condenseur, au moins une encoche longitudinale (16) s'étendant selon la première direction (X) formant une surface d'appui et de maintien de la feuille plane poreuse.
- [Revendication 7] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, le matériau constitutif d'un insert poreux (15, 17) étant à base de graphite, de préférence non mouillable par un métal d'apport pour brasage.
- [Revendication 8] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, la largeur d'un insert poreux étant comprise entre 0,1 et 1mm, de préférence de l'ordre de 0,6mm.
- [Revendication 9] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, la taille moyenne des pores d'un insert

poreux étant comprise entre 1 et 100 μm , de préférence de l'ordre de 50 μm .

- [Revendication 10] 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.
- [Revendication 11] 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.
- [Revendication 12] 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.
- [Revendication 13] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, la largeur dans le plan YZ d'un canal de liaison (12) étant comprise entre 0,1 et 1mm, de préférence de l'ordre de 0,2mm.
- [Revendication 14] 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.
- [Revendication 15] 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.
- [Revendication 16] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon la revendication 15, comprenant un canal vapeur unique central agencé entre n canaux liquides répartis latéralement de part et d'autre du canal vapeur.
- [Revendication 17] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, au moins une des plaques d'extrémité présentant une surface supérieure à celle des plaques intermédiaires dans une direction transversale à celle (Z) de l'empilement de sorte à former des diffuseurs thermiques.
- [Revendication 18] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, la section transversale dans le plan XY de l'évaporateur intégrant l'insert poreux et/ou celle du condenseur, de préférence rectangulaire, étant supérieure à celle de la zone adiabatique du caloduc.

- [Revendication 19] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, les structurations de l'évaporateur et le cas échéant du condenseur comprenant une pluralité de plots répartis, de préférence uniformément, le long de la première direction (X).
- [Revendication 20] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'une des revendications précédentes, comprenant des moyens d'échange thermique au niveau de la première extrémité et/ou deuxième extrémité, les moyens d'échange thermique au niveau de la deuxième extrémité comportant avantageusement une ou plusieurs ailettes en contact thermique avec au moins une des plaques de fermeture.
- [Revendication 21] Caloduc (1) à pompage capillaire à rainures réentrantes selon la revendication 20, les moyens d'échange thermique comprenant un circuit fluide (32) en contact thermique avec au moins une des plaques de fermeture (12), ledit circuit étant formé par une plaque (36) structurée de sorte à délimiter des canaux (38), lesdits canaux (38) étant fermés par ladite plaque de fermeture (12) et une plaque de fermeture supplémentaire (40), les moyens d'échange thermique comportant également des moyens pour alimenter en fluide caloporteur ledit circuit fluide.
- [Revendication 22] 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.
- [Revendication 23] 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 (\diamond_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]

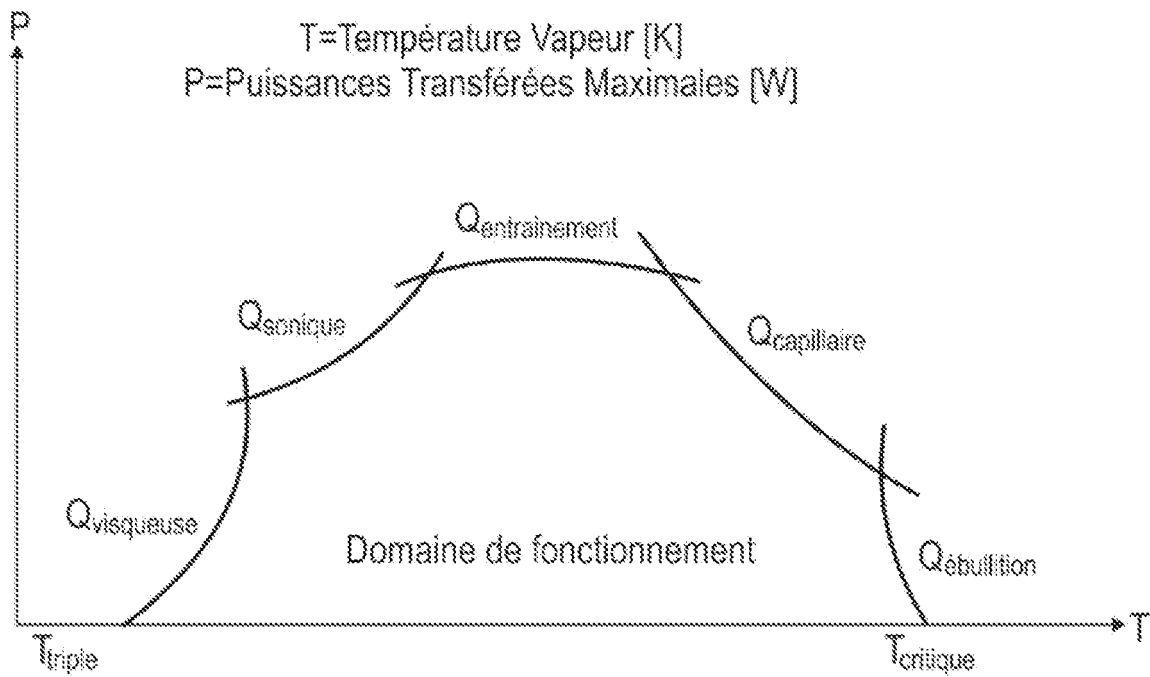


Fig. 1

[Fig. 2]

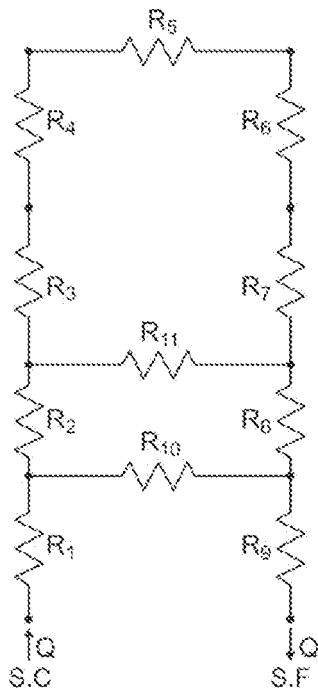


Fig. 2

[Fig. 3]

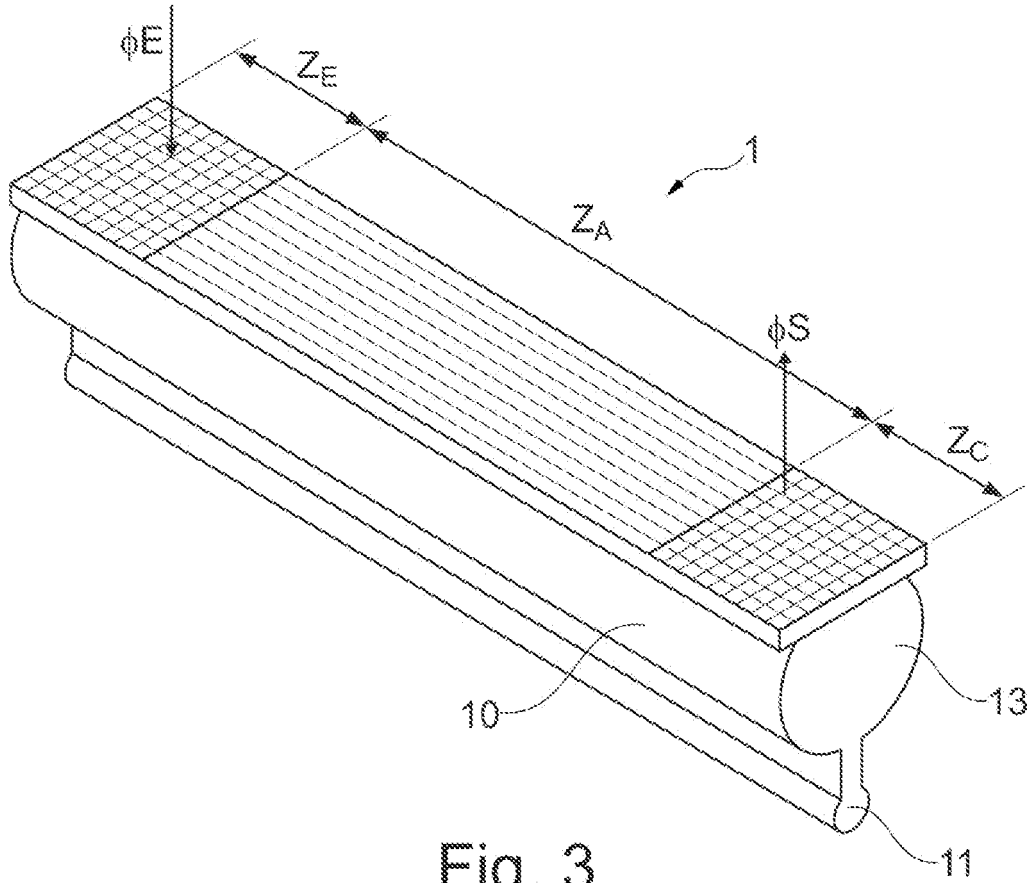


Fig. 3
(ETAT DE L'ART)

[Fig. 3A]

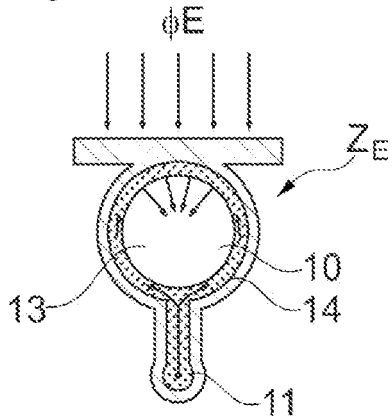


Fig. 3A

[Fig. 3B]

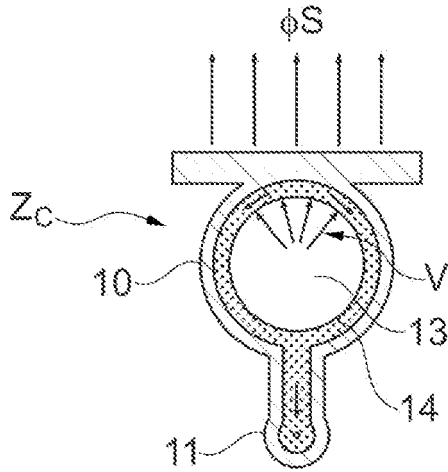


Fig. 3B

[Fig. 4]

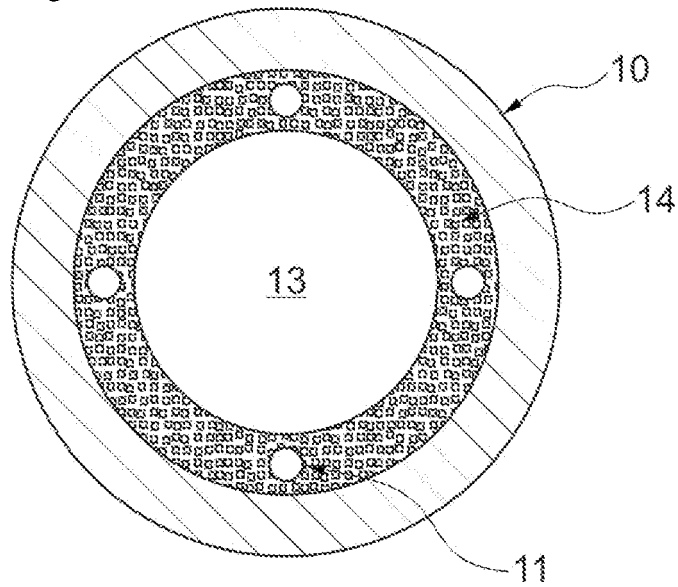


Fig. 4

(ETAT DE L'ART)

[Fig. 5]

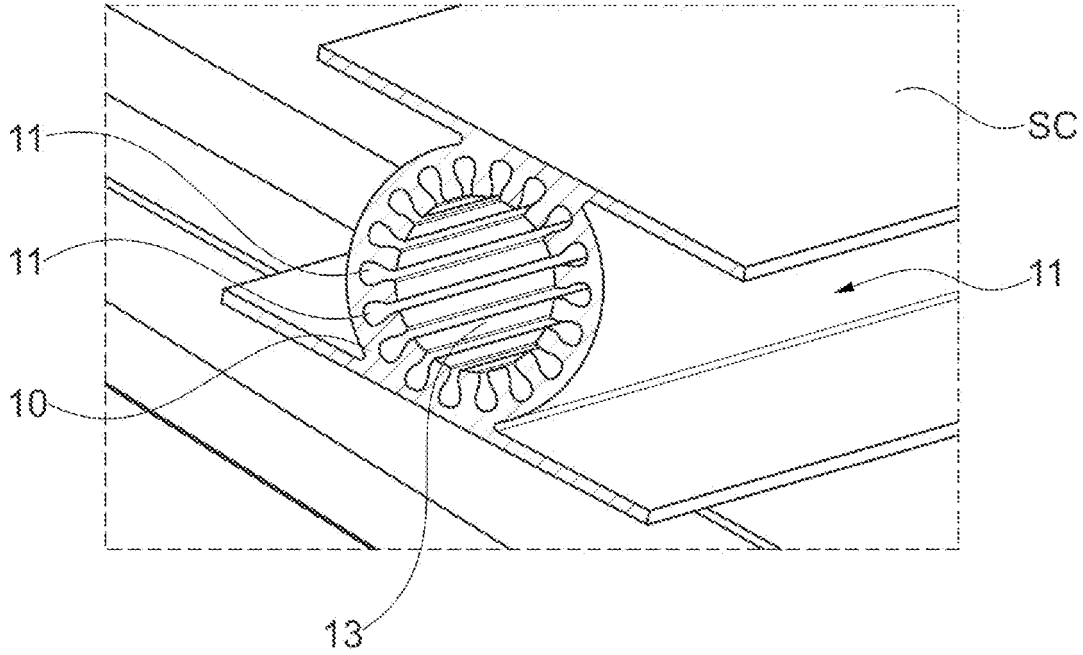


Fig. 5
(ETAT DE L'ART)

[Fig. 6]

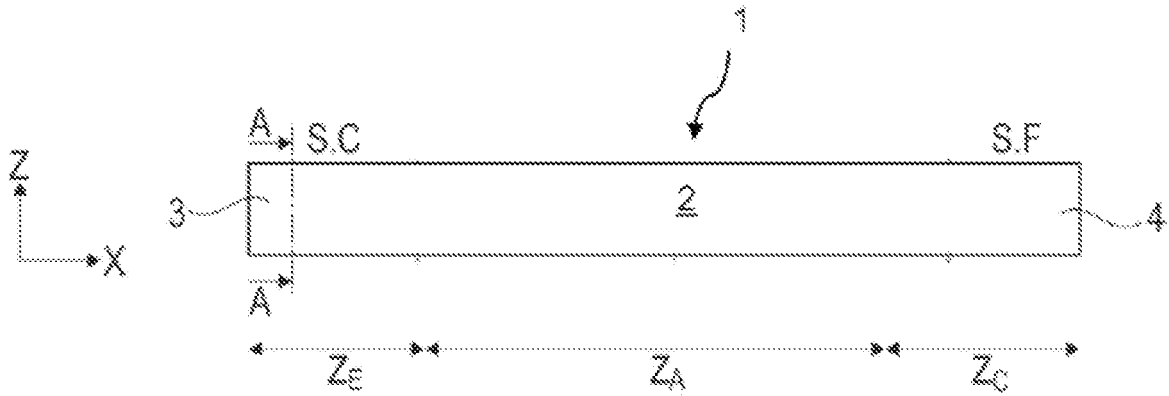


Fig.6
(ETAT DE L'ART)

[Fig. 7]

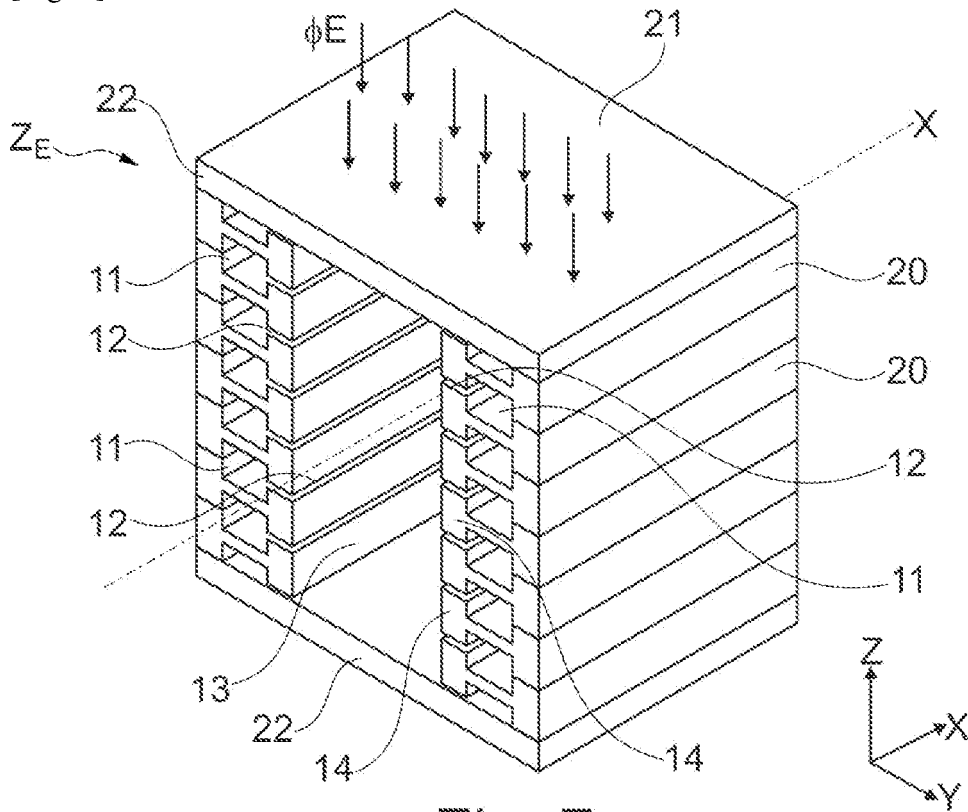


Fig. 7
(ETAT DE L'ART)

[Fig. 8]

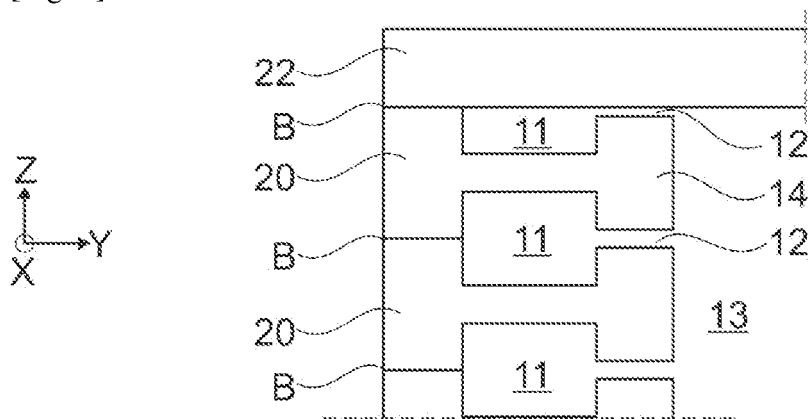


Fig. 8
(ETAT DE L'ART)

[Fig. 9]

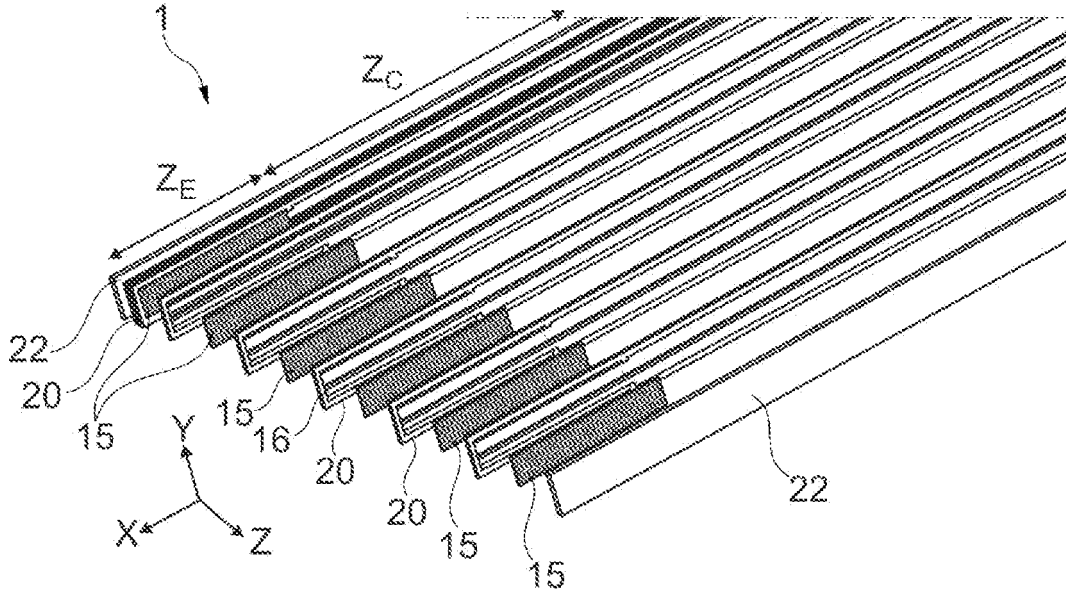


Fig. 9

[Fig. 10]

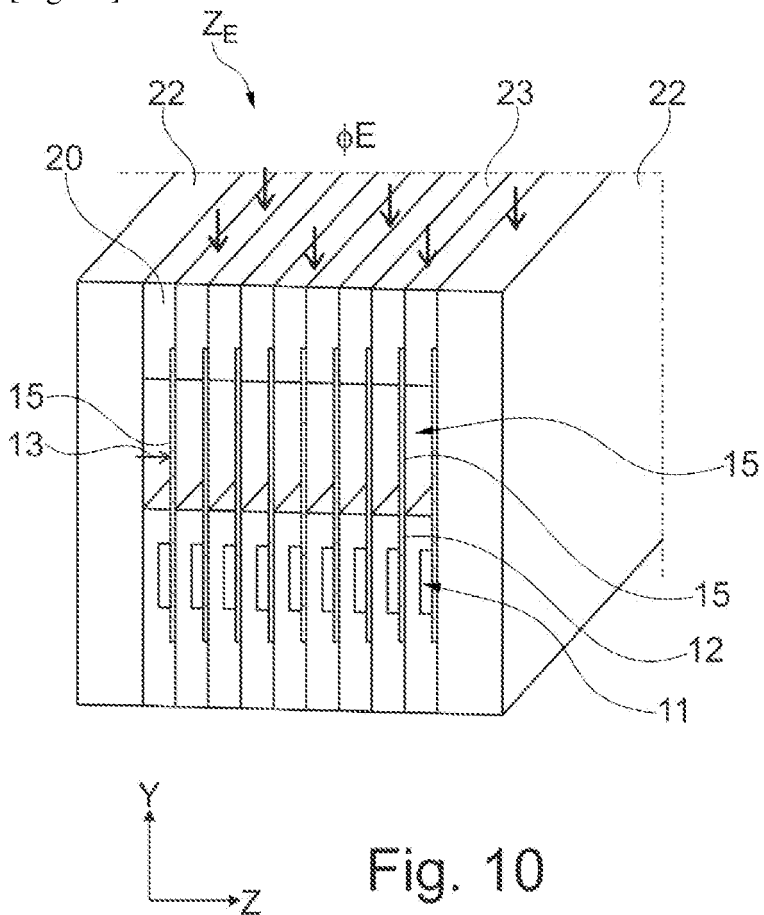
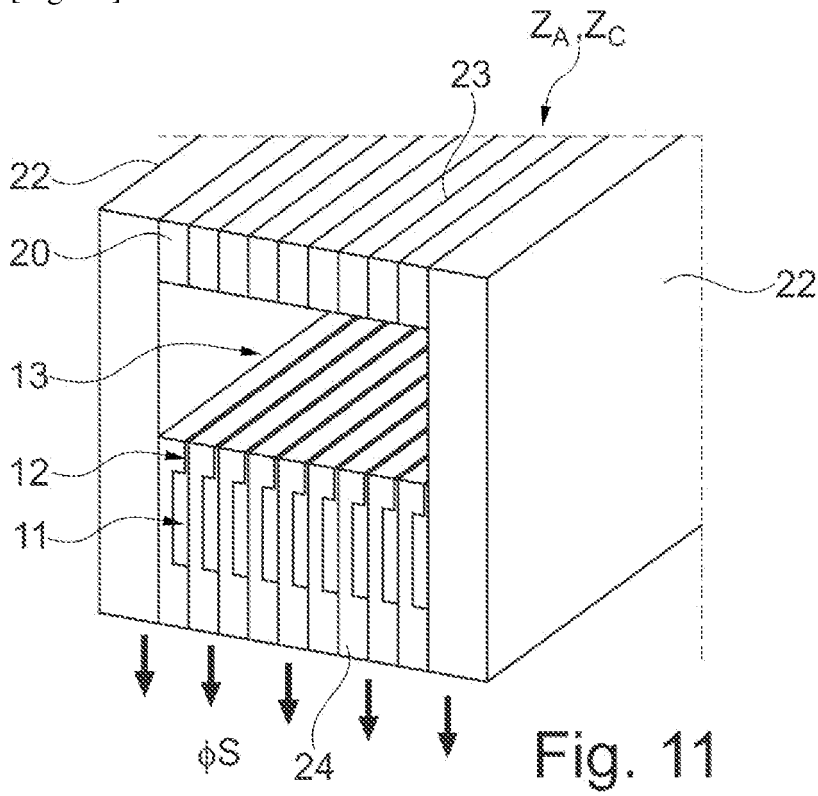
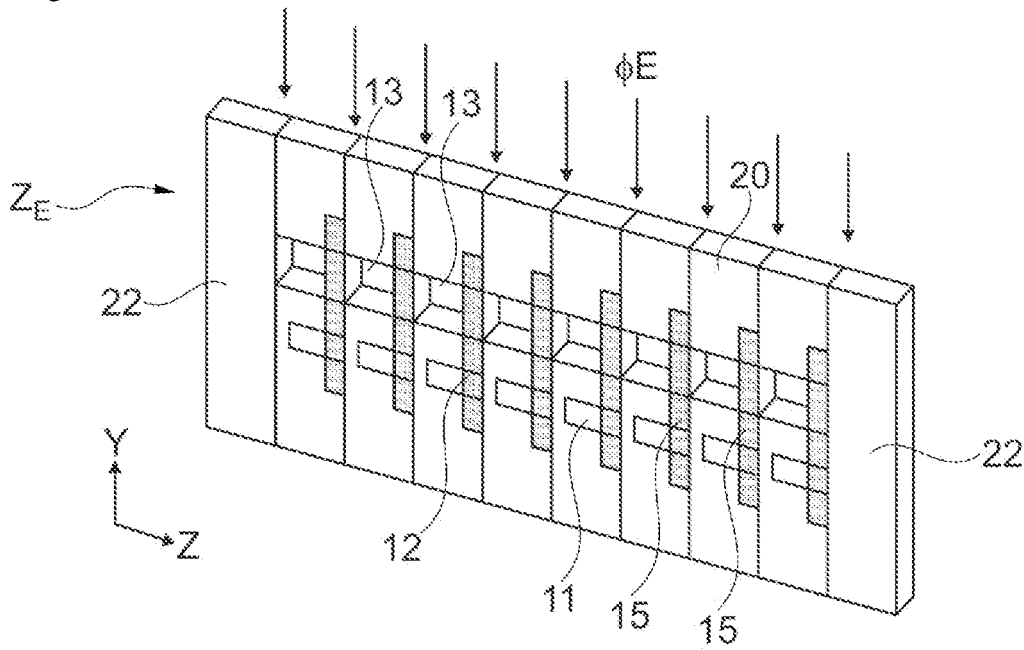


Fig. 10

[Fig. 11]



[Fig. 12]



[Fig. 13]

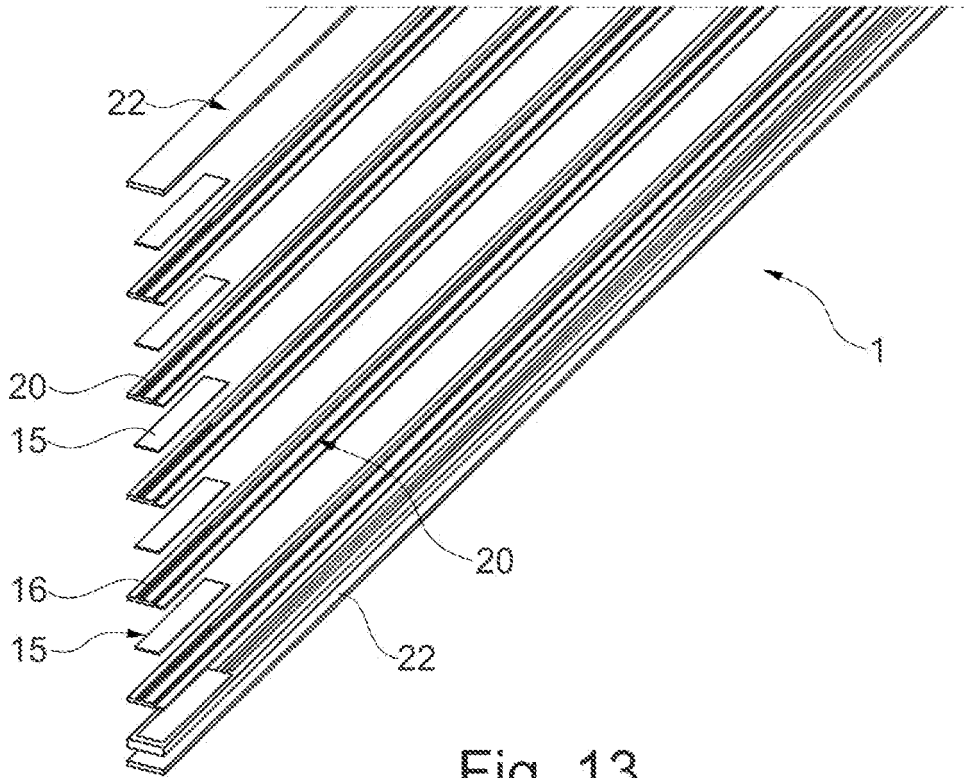


Fig. 13

[Fig. 14]

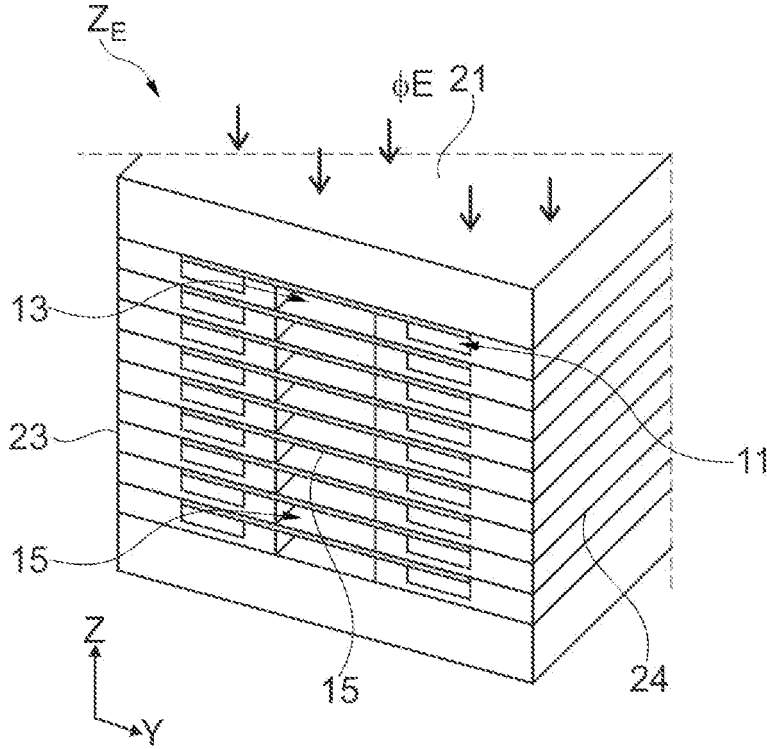


Fig. 14

[Fig. 15]

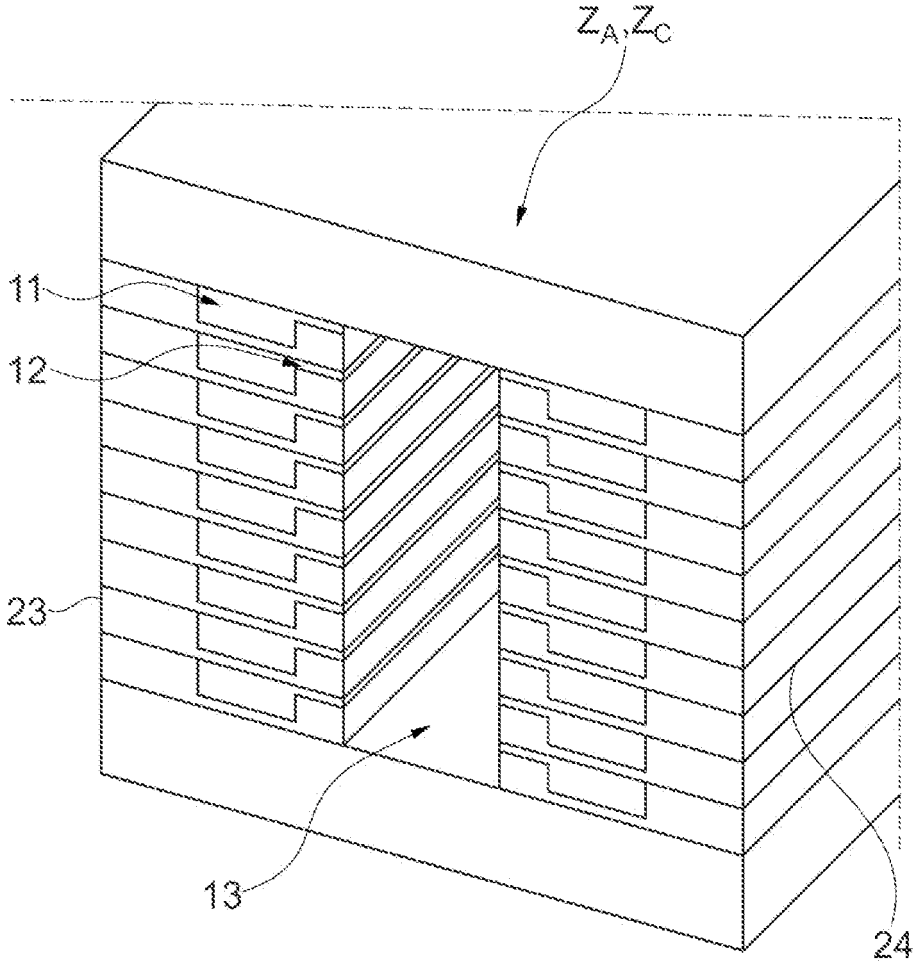


Fig. 15

[Fig. 16]

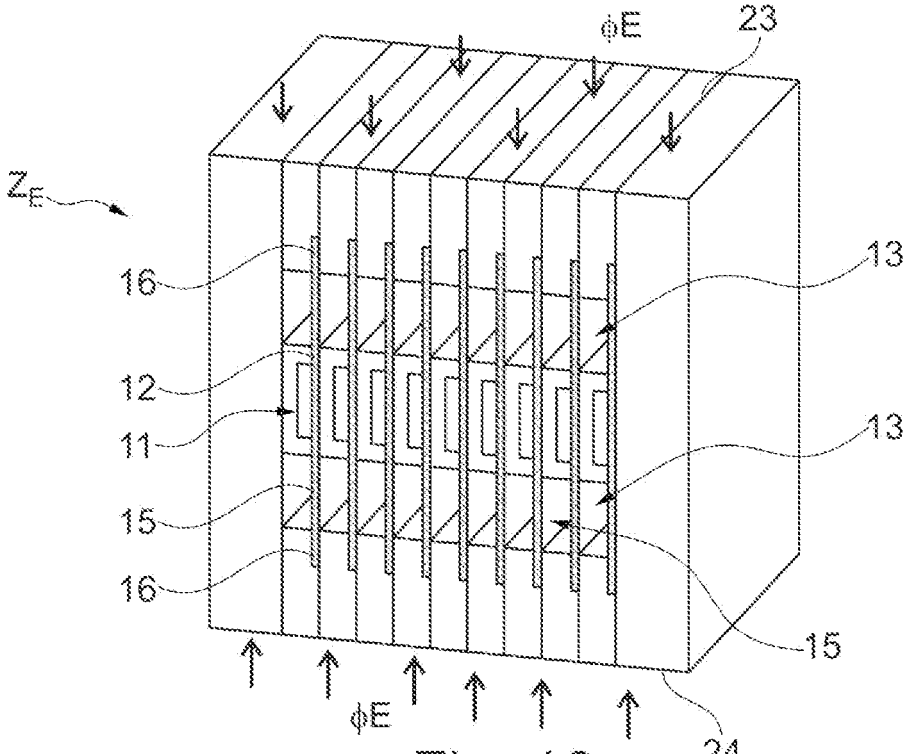


Fig. 16

[Fig. 17]

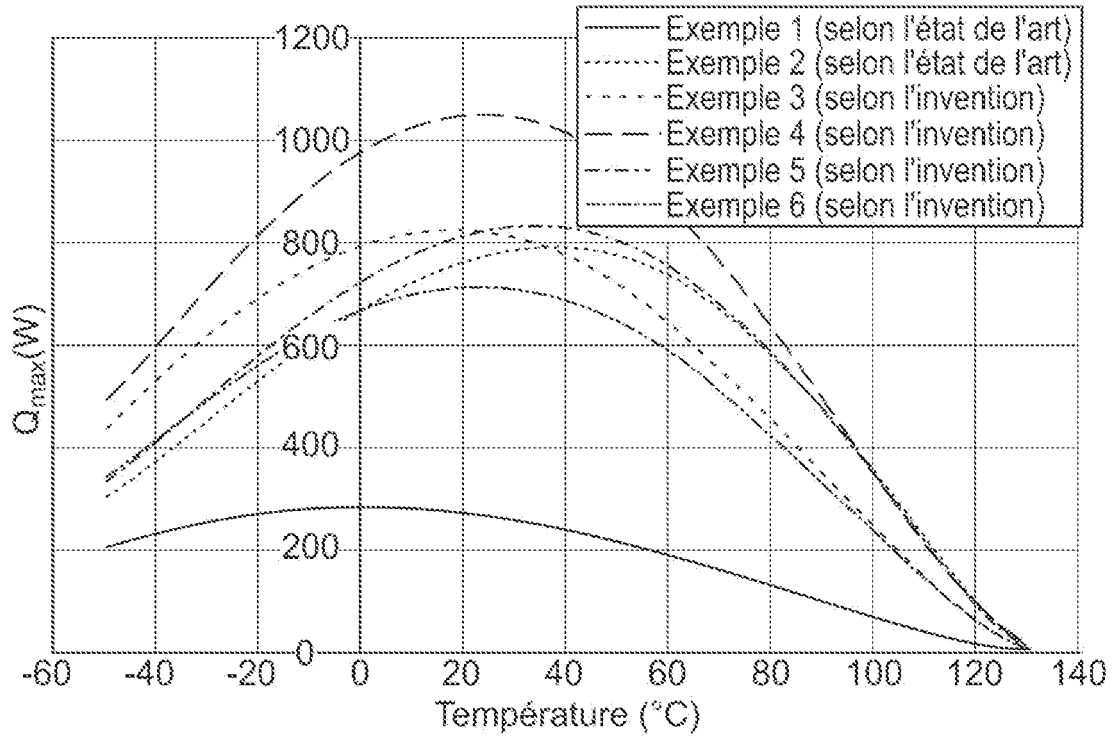


Fig. 17

[Fig. 18]

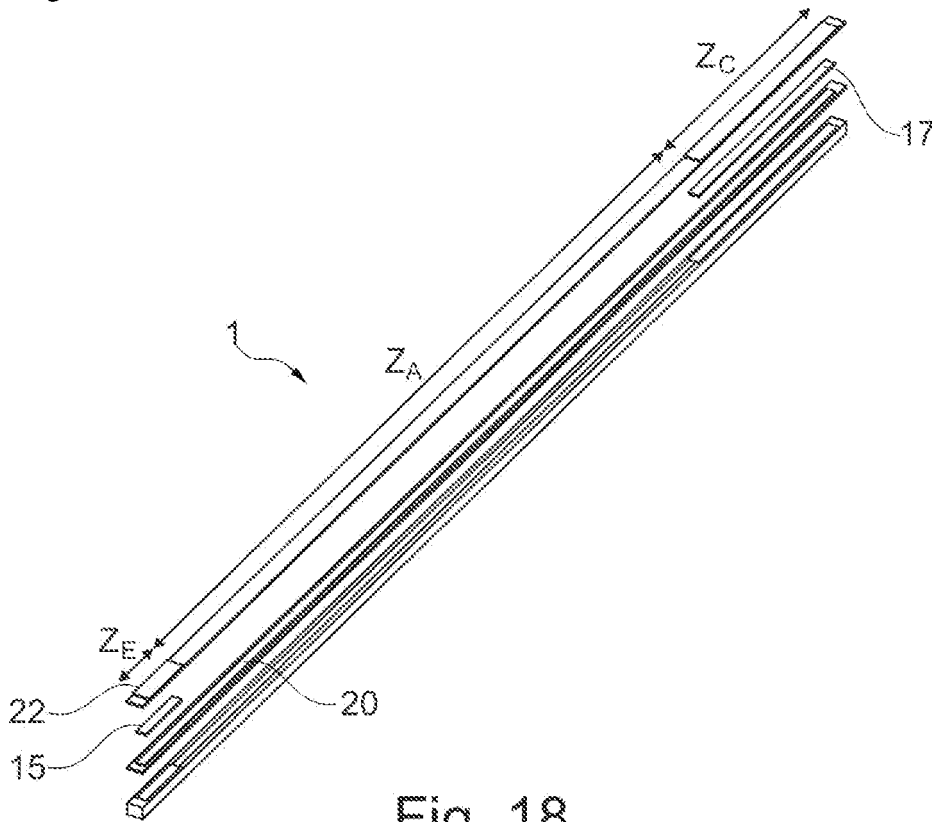


Fig. 18

[Fig. 19]

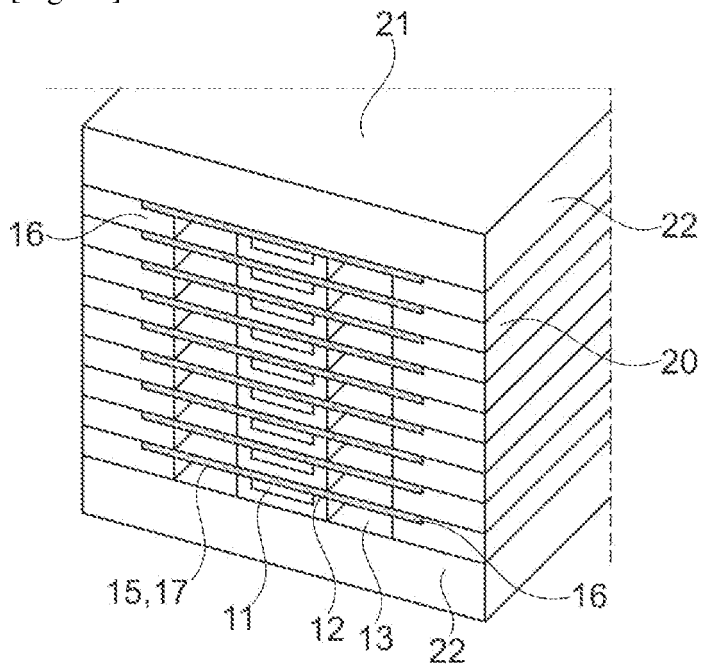


Fig. 19

[Fig. 20]

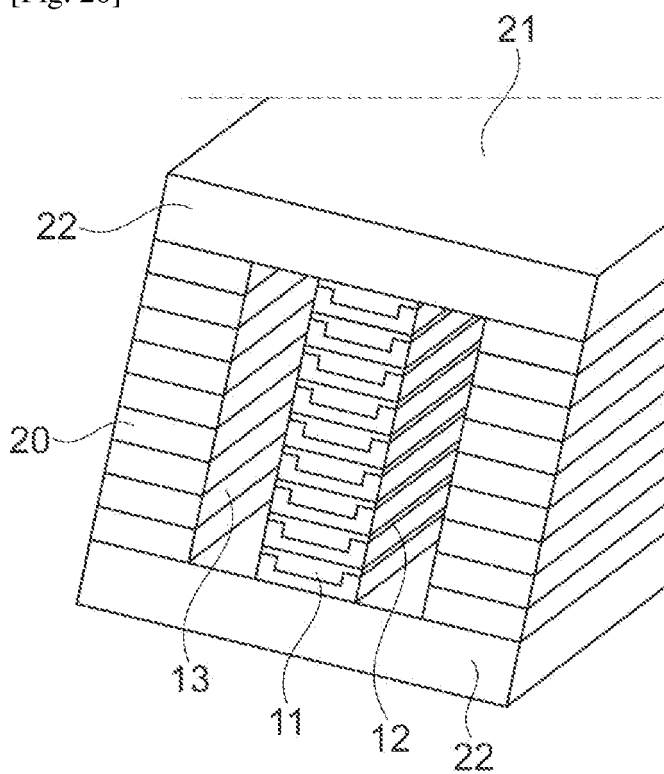


Fig. 20

[Fig. 21]

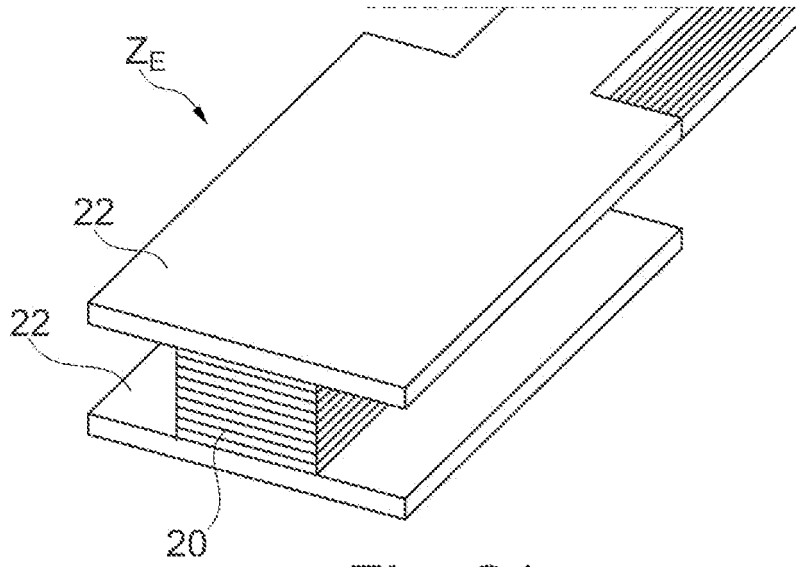


Fig. 21

[Fig. 22]

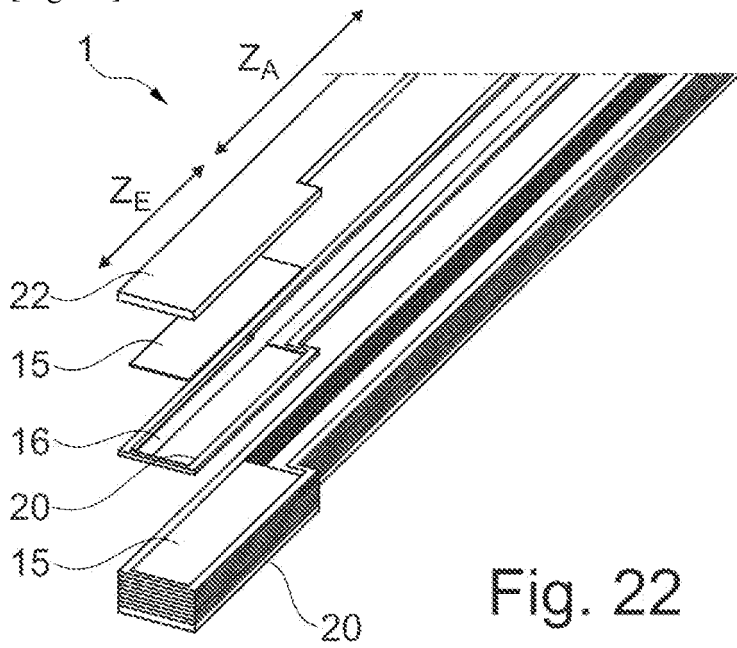
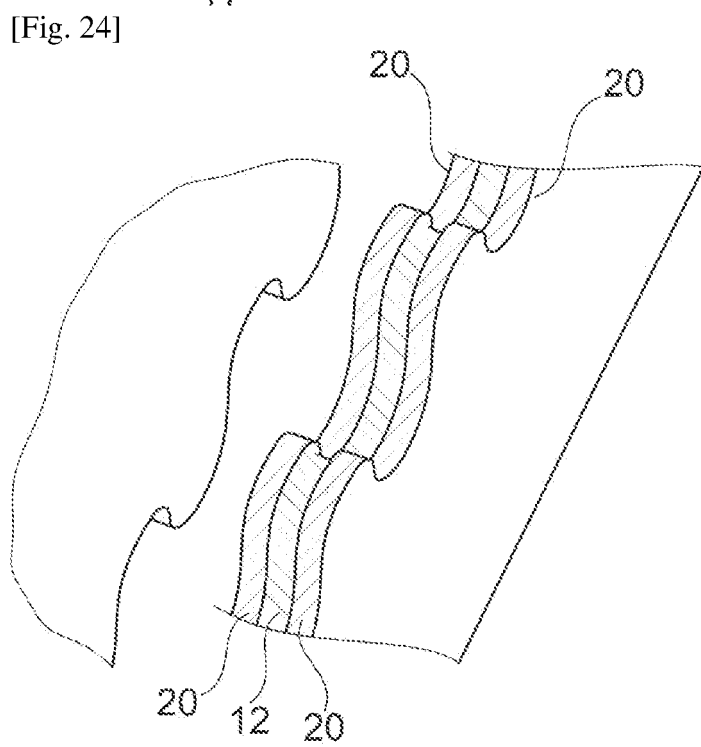
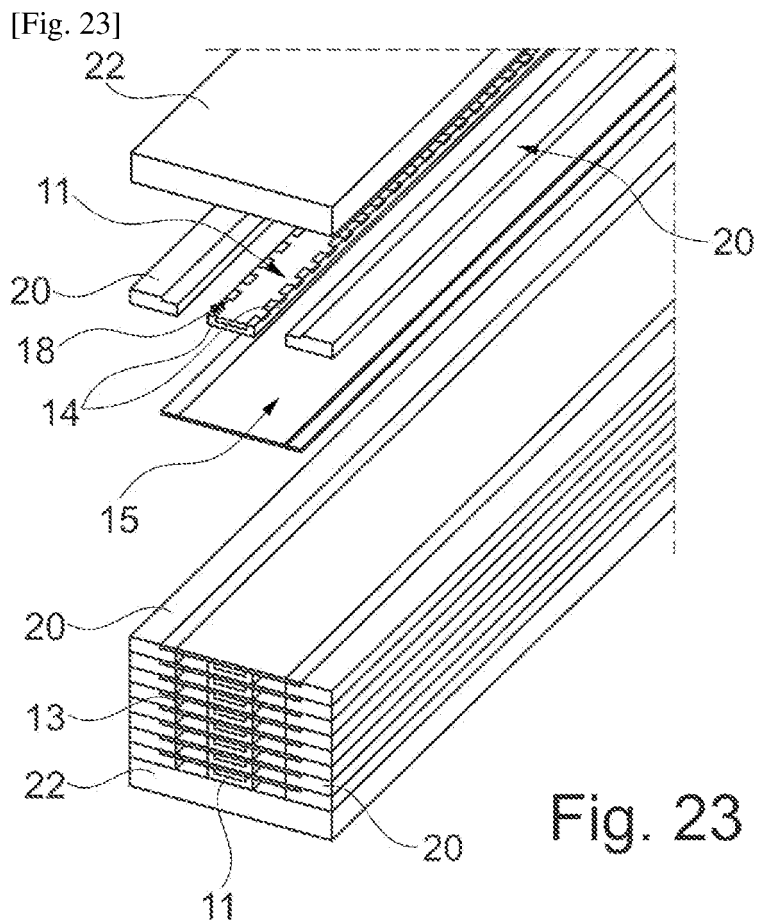


Fig. 22



[Fig. 25]

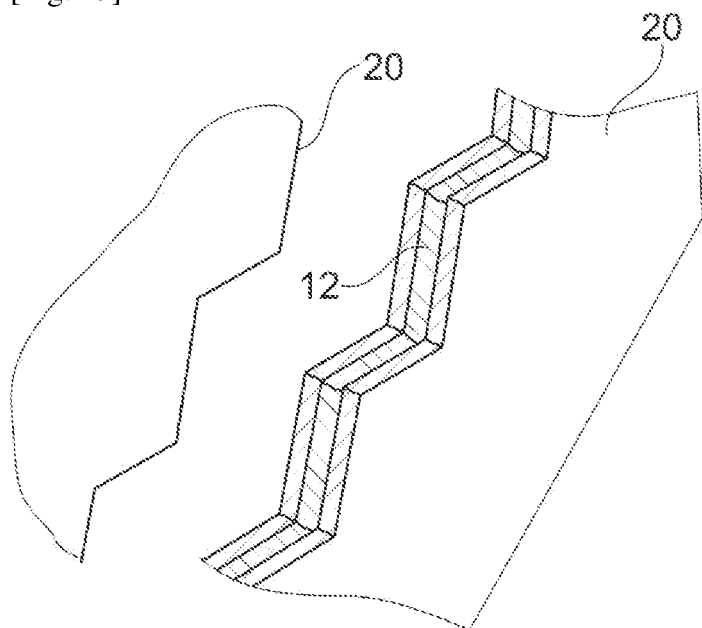


Fig. 25

[Fig. 26]

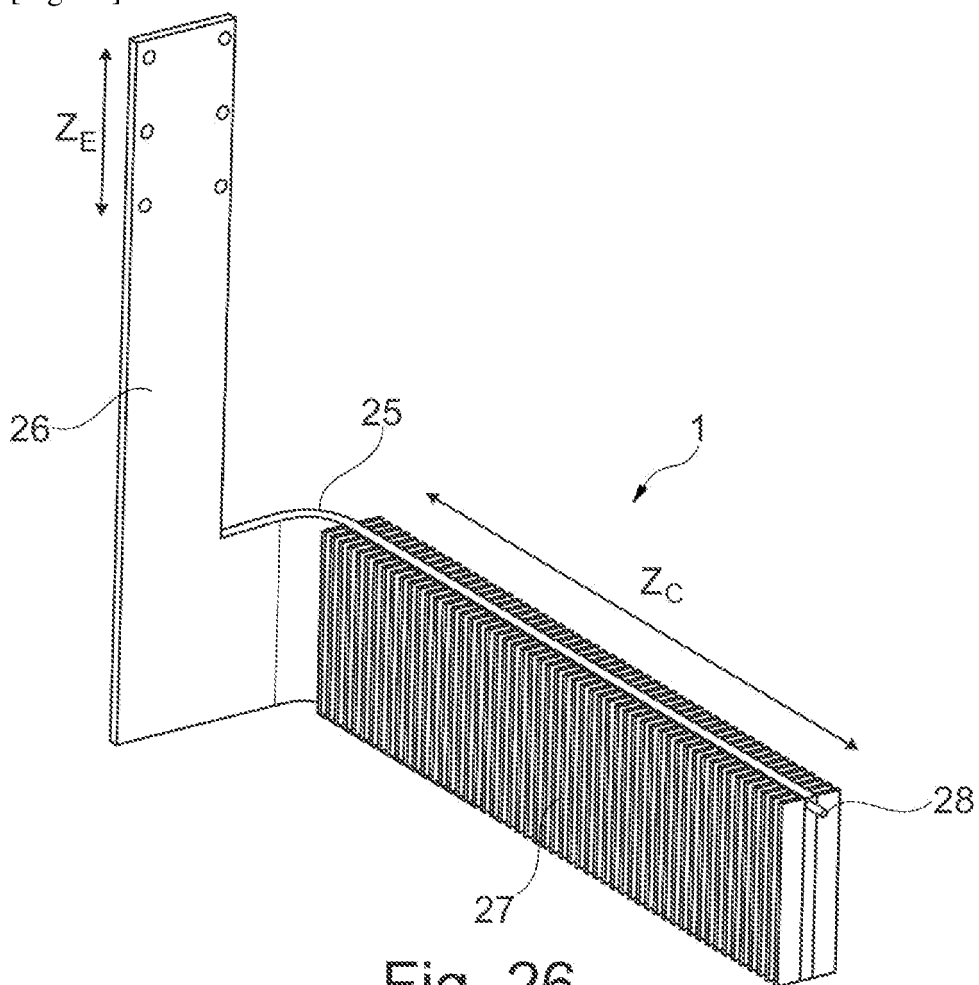


Fig. 26

[Fig. 27A]

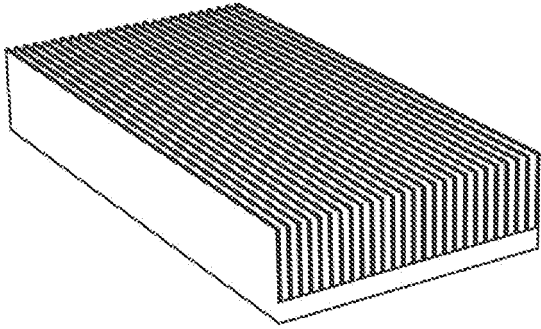


Fig. 27A

[Fig. 27B]

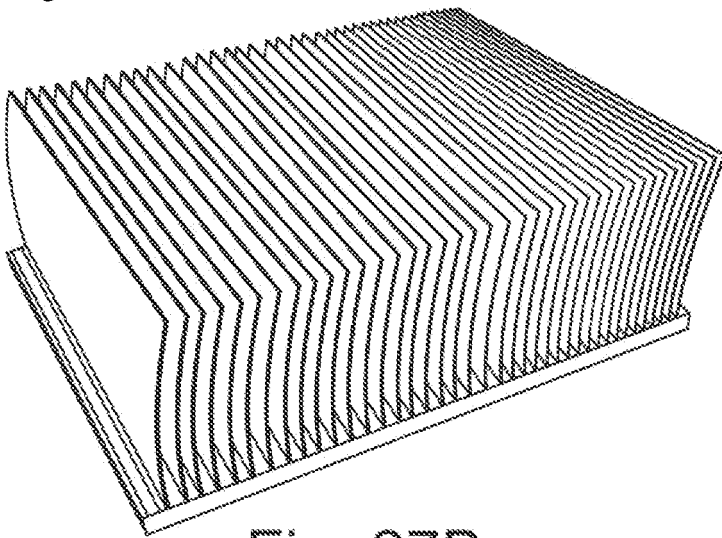


Fig. 27B

[Fig. 27C]

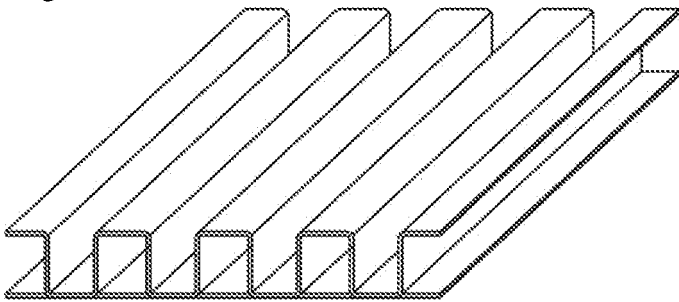


Fig. 27C

[Fig. 27D]

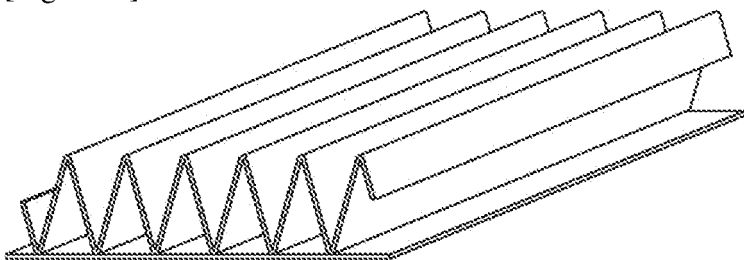


Fig. 27D

[Fig. 27E]

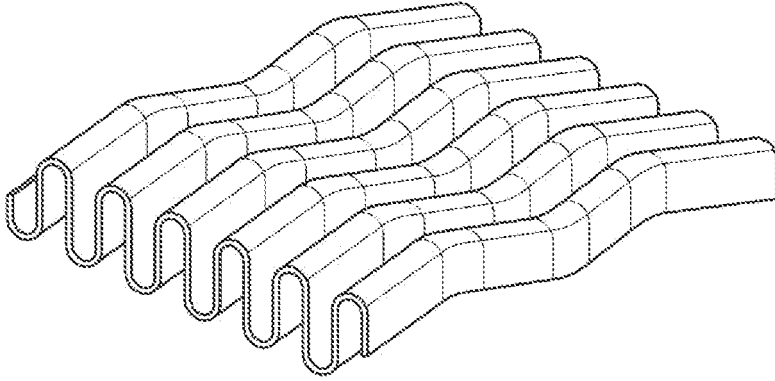


Fig. 27E

[Fig. 27F]

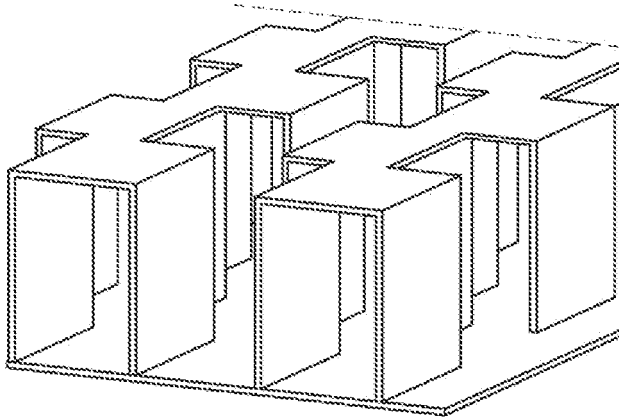


Fig. 27F

[Fig. 27G]

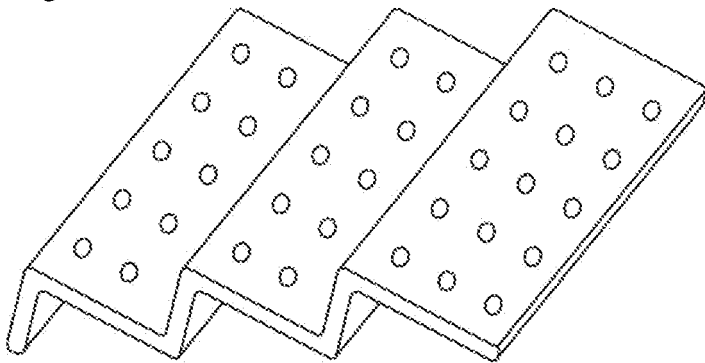


Fig. 27G

[Fig. 27H]

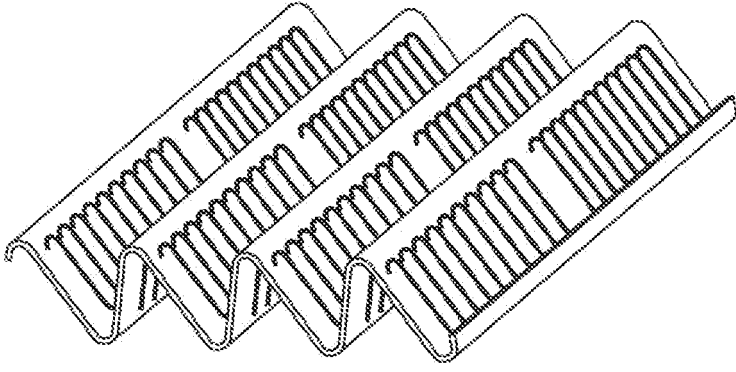


Fig. 27H

[Fig. 28]

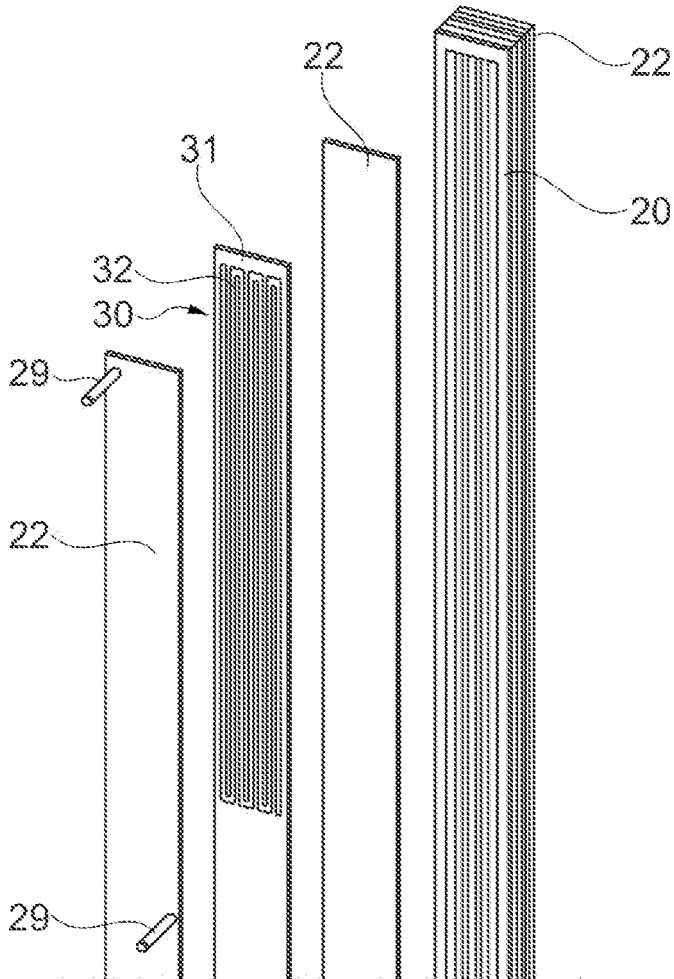


Fig. 28

RAPPORT DE RECHERCHE

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

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

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

NEANT

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

EP 3 553 445 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR])
16 octobre 2019 (2019-10-16)

FR 2 776 764 A1 (ATMOSTAT ETUDES ET RECH [FR]) 1 octobre 1999 (1999-10-01)

EP 3 561 428 A1 (COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE [FR])
30 octobre 2019 (2019-10-30)

EP 3 809 083 A1 (SHINKO ELECTRIC IND CO [JP]) 21 avril 2021 (2021-04-21)

US 4 422 501 A (FRANKLIN JAMES L [US] ET AL) 27 décembre 1983 (1983-12-27)

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

NEANT