

①2 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

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.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *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 ATO-  
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablis-  
sement 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 ATO-  
MIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES Etablis-  
sement public à caractère industriel et commercial.

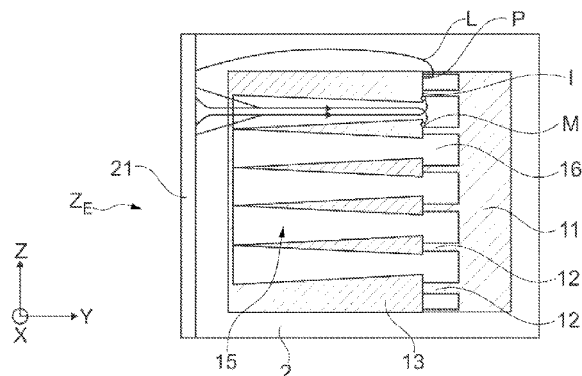
⑦4 Mandataire(s) : CABINET NONY.

⑤4 Caloduc à section transversale non cylindrique, comprenant un évaporateur à structure d'interface vapeur/liquide améliorée afin d'augmenter la limite d'ébullition.

⑤7 Caloduc à section transversale non cylindrique, comprenant un évaporateur à structure d'interface vapeur/liquide améliorée afin d'augmenter la limite d'ébullition.

L'invention concerne un caloduc (1) 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 chauffée par une source chaude SC pour former, au sein de l'enceinte, un évaporateur (ZE) et une deuxième extrémité longitudinale (4) destinée à être refroidie par une source froide SF pour former un condenseur (ZC), l'enceinte étanche délimitant une zone adiabatique (ZA) entre l'évaporateur et le condenseur, l'évaporateur comprenant un canal vapeur (13), au moins un canal liquide (11) relié au canal vapeur en définissant au moins une interface liquide-vapeur (I), et une pluralité de montants (15) formant des piliers de conduction thermique qui s'étendent au moins dans le canal vapeur selon une deuxième direction (Y) orthogonale à (X), depuis une face latérale (21) de l'enceinte à partir de laquelle le flux provenant de la source chaude est appliqué, jusqu'à l'interface liquide-vapeur.

Figure pour l'abrégé: fig. 6A



## **Description**

**Titre de l'invention : Caloduc à section transversale non cylindrique, comprenant un évaporateur à structure d'interface vapeur/liquide améliorée afin d'augmenter la limite d'ébullition.**

### **Domaine technique**

- [0001] La présente invention concerne un caloduc, notamment à pompage capillaire à rainures réentrantes.
- [0002] La présente invention vise à améliorer la limite d'ébullition 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 (les condensats) circule dans le réseau capillaire et revient vers l'évaporateur pour refaire un cycle, sous l'effet de forces capillaires, lorsque le caloduc n'est pas soumis à la gravité. Le retour du fluide liquide du condenseur à l'évaporateur est obtenu par pompage capillaire.
- [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 sa-

tellites. 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 réentrantes sont des exemples particuliers de caloducs à rainures, dans lesquels les rainures présentent un canal de liaison étroit par rapport au reste de la rainure, ce qui permet d'augmenter l'effet de pompage capillaire tout en limitant les pertes de charge 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] Sur la plage de températures de fonctionnement d'un caloduc, différentes limites physiques peuvent limiter ses performances. La courbe de fonctionnement du caloduc, qui permet de connaître sa capacité de transport maximum, est obtenue par la réunion des courbes correspondant aux différentes limites physiques de fonctionnement qui définissent au final le domaine de fonctionnement du caloduc en termes de puissance maximale qu'il peut transférer.
- [0012] 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  $Q_{visqueuse}$ ,  $Q_{sonique}$ ,  $Q_{entraînement}$ ,  $Q_{capillaire}$ ,  $Q_{ébullition}$ , définissent respectivement les limites visqueuse, sonique, d'entraînement, capillaire et d'ébullition.
- [0013] Dans le cadre de l'invention, les inventeurs se sont intéressés plus spécifiquement à la limite d'ébullition.
- [0014] Cette limite de fonctionnement se définit comme le flux (ou la densité de flux) maximum, pour lequel des bulles créées à la paroi du canal liquide à l'évaporateur peuvent migrer sans être bloquées dans les canaux de liaison jusqu'au ménisque

d'interface liquide-vapeur.

- [0015] La limite d'ébullition a ainsi pour origine la naissance de bulles de vapeur au sein du réseau capillaire, lorsque la densité de flux thermique radial à l'évaporateur devient trop importante.
- [0016] Ainsi si la densité de flux radial est trop grande, la circulation du liquide dans la structure capillaire peut être affectée par l'apparition de bulles piégées ou par une congestion d'un grand nombre de bulles qui migrent vers le canal liquide. Cela perturbe l'hydrodynamique du caloduc, dégrade ses performances et in fine son fonctionnement, voire le stoppe, et entraîne un assèchement de la paroi, ce qui signifie qu'il y a surchauffe au niveau de la source à thermaliser.
- [0017] De manière conservative, on considère que la limite d'ébullition est le flux ou la densité de flux pour laquelle les premières bulles apparaissent à la paroi de l'évaporateur d'un caloduc.
- [0018] On a illustré de manière schématique en figures 3A à 3C ce phénomène d'apparition des bulles qui peut se produire dans l'évaporateur d'un caloduc à rainures réentrantes à section transversale en forme générale d'Omega, tel que celui illustré à la [Fig.2].
- [0019] 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).
- [0020] Sur la [Fig.3A], sous l'effet du flux thermique  $\phi_E$  entrant, provenant de la source de chaleur SC, l'ébullition a, à l'interface I entre liquide et vapeur, la forme d'un film F, aucune bulle n'est créée. Le fonctionnement est nominal.
- [0021] Sur la [Fig.3B], il y a une ébullition nucléée, mais la taille des bulles B créées est suffisamment petite pour qu'elles s'échappent par le canal de liaison 12 via le ménisque M à l'interface vers la phase vapeur 13. Toutefois, si la densité des bulles B est trop importante, la mise en place du ménisque M peut être altérée et très dégradée, ce qui altère le pompage capillaire.
- [0022] Sur la [Fig.3C], il y a aussi une ébullition avec une taille des bulles B trop importante ou un nombre de bulles trop élevé qui ne leur permet pas de s'échapper par le canal de liaison 12 via le ménisque M vers la phase vapeur. Les bulles B remontent alors dans le canal liquide 11. Il y a également un risque d'assèchement local de la paroi.
- [0023] La limite d'ébullition est associée à une densité de puissance thermique radiale qui s'exprime généralement en  $W/m^2$ : elle est proportionnelle à la surface de l'évaporateur du caloduc, c'est-à-dire que pour un même design (même section transversale sur toute la longueur de l'évaporateur), la limite d'ébullition, exprimée en W, d'un caloduc dont

la longueur de l'évaporateur est de 10 centimètres est la moitié de celle d'un caloduc dont la longueur d'évaporateur est de 20 centimètres.

[0024] La puissance thermique maximum avant l'apparition de la limite d'ébullition est donnée par l'équation suivante:

[0025] [Equation 1]

$$Q_{\text{ébullition}} = G_{eq} \Delta T_{\text{surchauffe}}$$

[0026] avec  $G_{eq}$  qui est la conductance équivalente au niveau de l'évaporateur (en W/K), et  $\Delta T_{\text{surchauffe}}$ , le gradient de température entre la paroi et la température vapeur nécessaire à l'apparition d'une bulle (en K).

[0027] Par la relation de Clausius-Clapeyron, on peut relier  $\Delta T_{\text{surchauffe}}$  au rayon des bulles :

[0028] [Equation 2]

$$\Delta T_{\text{surchauffe}} = \frac{\sigma_l T_v}{\rho_v h_{lv}} \left( \frac{1}{R_b} - \frac{1}{R} \right)$$

[0029] dans laquelle  $\sigma_l$  désigne la tension superficielle du fluide (N/m),  $T_v$  la température de la vapeur  $\rho_v$  la densité de la vapeur,  $h_{lv}$  l'enthalpie de vaporisation du fluide,  $R_b$  le rayon des bulles et  $R$  le rayon du ménisque.

[0030] Pour repousser la limite d'ébullition, on peut augmenter donc la conductance à l'évaporateur ( $G_{eq}$ ), ou augmenter la surchauffe, notamment en modifiant l'état de surface des canaux liquides, afin de diminuer le rayon de bulles. Pour cela, on peut diminuer les rugosités des canaux, ce qui peut par exemple être fait en réalisant un polissage électrolytique des tôles avant ou après usinage.

[0031] On peut aussi augmenter le rayon du ménisque de l'interface liquide-vapeur mais cela est contre-productif pour les forces de pompage capillaire.

[0032] Outre les caloducs à section transversale en Omega, les caloducs à rainures axiale présentent une section transversale cylindrique et la voie de retour du liquide du condenseur vers l'évaporateur est située à la périphérie de cette section cylindrique : [1]. Les caloducs avec d'autres sections, rectangulaires ou carrées, voir triangulaires possèdent cette même caractéristique généralement.

[0033] Les caloducs à artère sont favorables pour repousser la limite d'ébullition. Un caloduc 1 à artère est représenté aux figures 4, 4A et 4B : tous 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  $\Phi_E$  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  $\Phi_S$  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.

- [0034] 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  $\Phi_E$  de la source chaude, et cela joue un rôle dans l'éloignement de la limite d'ébullition.
- [0035] 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.5]. 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.
- [0036] Les boucles diphasiques à pompage capillaire constituent également un autre type de dispositifs favorables pour repousser la limite d'ébullition. On pourra se référer à la publication [2] qui donne une définition et décrit précisément ce type de système diphasique de contrôle thermique. Une boucle diphasique à pompage capillaire, comme un caloduc, a pour but de transférer un flux d'énergie thermique depuis une source chaude (évaporateur) vers une source froide (condenseur) en utilisant un fluide à l'équilibre liquide-vapeur et ses changements de phase. Dans une boucle diphasique à pompage capillaire, l'évaporateur et le condenseur sont reliés par des conduites indépendantes et comme le définissent eux-mêmes les auteurs de la publication [2]: contrairement aux caloducs, les phases liquide et vapeur sont séparées et circulent dans le même sens dans des conduites différentes. On pourra également se reporter à la figure 3 pour comprendre la structure d'une telle boucle diphasique, dans laquelle l'évaporateur assure le pompage capillaire, afin d'entraîner la phase liquide provenant du condenseur vers l'évaporateur. Les schémas des figures 3 à 5 proposés par les auteurs de la publication [2] montrent que le flux de chaleur à l'évaporateur n'est pas directement appliqué sur la phase liquide, mais au niveau du milieu poreux qui constitue une interface entre les deux phases, liquide et vapeur, en permettant également une démultiplication des lignes et points triples, favorable à l'évaporation sans créer de potentiels blocages de bulles ou destruction des ménisques, ou bien de reflux de bulles dans le canal liquide.
- [0037] En revenant à la technologie des caloducs à rainures axiale, à ce jour, aucun

agencement spécifique n'est mis en place pour éloigner la limite d'ébullition. Les canaux liquides sont directement configurés sous la zone où arrive le flux thermique de la source chaude, et de ce fait, sont sujets aux limitations décrites précédemment. En effet, sur une plage de température haute, due principalement à la variation des propriétés physiques, la limite d'ébullition est atteinte et conditionne le fonctionnement du caloduc.

- [0038] Il est toujours possible d'appliquer le flux de chaleur à évacuer au niveau de l'évaporateur depuis un côté opposé aux canaux liquides lorsque ceux-ci ne sont pas répartis sur toute la périphérie du caloduc, sans aucun agencement particulier. Mais cela n'est pas favorable à la résistance thermique locale au niveau de l'évaporateur et détériore la chaîne thermique et la conductance du caloduc. Réduire le flux au niveau des canaux liquides a pour avantage d'éviter la problématique de l'apparition des bulles dans le liquide, qui détériore l'hydrodynamisme du caloduc. Il faut pour cela s'assurer que le flux thermique soit bien transmis aux parties solides du caloduc dans la zone de transition, où les ménisques interfaciaux liquide-vapeur sont configurés. Dans le même temps cet agencement ne doit pas gêner le développement et la migration de la phase vapeur vers le condenseur (point froid).
- [0039] De nombreuses solutions aux problématiques générales d'interface liquide-vapeur et de limite d'ébullition sont connues dans la littérature scientifique.
- [0040] Ainsi, les auteurs de la publication [3] investissent une nouvelle structure d'évaporateur à artère et mettent en avant l'intérêt d'appliquer le flux thermique indirectement sur l'interface liquide-vapeur et de prévoir en même temps des dégagements pour l'évacuation de la phase vapeur engendrée.
- [0041] Les auteurs de la publication [4] ont étudié une configuration d'évaporateur de boucle diphasique à pompage capillaire, où le flux de chaleur est appliqué au niveau de l'interface liquide vapeur d'un matériau poreux qui assure la force motrice du fluide dans la boucle. En effet, ces deux fonctions sont décorrélées, le flux s'applique d'après les auteurs sur une lame de liquide issue du milieu poreux contenant la phase liquide. Toujours d'après les auteurs, lorsque l'évaporation intervient via cette lame liquide et, indirectement, via également l'interface liquide-vapeur configurée à la surface du milieu poreux, le flux de chaleur est amené par la phase vapeur (fluide déjà évaporé). Cela ne résout pas la problématique de flux critique d'ébullition (assèchement). Cependant, les bulles potentiellement créées dans la lame de fluide (post milieu poreux) ne viennent pas interférer avec l'hydrodynamisme de la boucle (pompage capillaire).
- [0042] Les auteurs de la publication [5] ont étudié un milieu poreux d'évaporateur d'une boucle diphasique à pompage capillaire dans lequel un gradient de porosité est réalisé avec une forme de fractale. Les auteurs ont jugé leurs résultats prometteurs avec notamment une très bonne aptitude lors du démarrage du caloduc.

- [0043] L'article [6] montre une configuration de caloduc à rainures axiales dans la zone adiabatique associées avec un média poreux périphérique (poudre de métal frittée ou un écran à mèche) dans l'évaporateur. Il est mis en exergue l'impact du média poreux sur la capacité du caloduc à supporter de fortes densités de flux thermiques, qui sont en revanche appliquées directement sur une paroi en contact avec le média poreux.
- [0044] De cette littérature, les inventeurs de la présente invention ont conclu que les points suivants sont connus :
- [0045] A/ dissocier l'application de la source chaude d'un évaporateur au niveau de canaux liquides et/ou de milieu poreux contenant la phase liquide;
- [0046] B/ configurer des dégagements pour l'évacuation de la vapeur créée, simultanément à A/;
- [0047] C/ mettre en avant des gradients de porosité sous la forme d'une fractale dans les milieux poreux contenant une phase liquide et servant d'interface liquide vapeur pour générer la force de pompage capillaire dans un dispositif de transfert thermique;
- [0048] D/ agencer un média poreux à l'évaporateur d'un caloduc pour éloigner la limite d'ébullition.
- [0049] La littérature brevets divulgue également la mise en œuvre de milieux poreux dans les caloducs.
- [0050] US2002/0050341A1 propose ainsi un caloduc plat comprenant deux plaques, l'une constituant l'évaporateur et l'autre le condenseur, reliées entre elles par un élément structurel conducteur thermique et un média poreux appliqué sur ceux-ci.
- [0051] CN210165803U divulgue un caloduc à artère pour téléphone portable, comprenant un média poreux périphérique permettant le retour de la phase liquide à l'évaporateur, qui permet d'éloigner la limite d'ébullition.
- [0052] US8100170B2 divulgue plusieurs configurations originales d'évaporateur de caloduc en boucle, avec des plaques reliées par un insert et intégrant des milieux poreux, permettant d'agencer des canaux de circulation de liquide dans les plaques. Les canaux sont reliés à une entrée de liquide et une sortie vapeur.
- [0053] US6330907B1 divulgue un caloduc à section transversale cylindrique pour lequel le flux de chaleur appliqué à l'évaporateur est déconnecté de la phase liquide et appliqué dans une zone où circule le flux évaporé. Le flux de chaleur se transmet à l'interface liquide-vapeur configurée dans un media poreux ou des superpositions de médias poreux, entre la zone d'arrivée liquide et la zone d'évacuation de la phase vapeur, par des piliers de conduction.
- [0054] EP3628956A1 divulgue une boucle diphasique à pompage capillaire, intégrant des canaux liquides avec des surfaces poreuses périphériques pour assister la migration du flux liquide par effet capillaire. Les surfaces poreuses sont mises en œuvre par superposition de plaques usinées (gravure chimique) et assemblées entre elles par soudage-

diffusion.

[0055] Ainsi, que cela soit pour le domaine des caloducs plats, à artères, des évaporateurs de boucle diphasique à pompage capillaire, plusieurs agencements géométriques comme selon les documents brevets précités permettent de ne pas appliquer directement le flux thermique à évacuer au niveau des canaux liquides. Ces agencements prennent en compte aussi la transmission possible du flux thermique via un milieu poreux interfaçant la phase liquide et la phase vapeur, avec en outre des moyens d'évacuation de la phase vapeur depuis l'interface liquide vapeur. Cela est surtout décrit pour les évaporateurs de boucle diphasique à pompage capillaire, et suppose nécessairement des connections fluidiques qui lui sont propres, telles que l'entrée liquide et la sortie vapeur.

[0056] Par ailleurs, la demanderesse a proposé dans la demande de brevet EP3553444A1 un caloduc à artère, réalisé par empilement de plaques usinées ou mises en forme en aluminium claddées, structurellement différentes, solidarisiées entre elles avec étanchéité, qui peuvent être assemblées par différentes techniques de soudure, brasure sous vide ou collage. Un tel assemblage offre un degré de configurations bien plus élevé que celles de l'état de l'art. En particulier, dans ce caloduc à empilement de plaques, des liens thermiques sont réalisés entre les artères liquides et la zone d'application du flux, via le canal vapeur. La réalisation d'un tel caloduc n'est cependant pas pleinement satisfaisante dans la mesure où il est nécessaire d'usiner deux plaques différentes, et où l'ouverture du canal de liaison dépend uniquement de l'épaisseur d'une des plaques et reste soumis à une maîtrise des coulures de brasures lors d'un process d'assemblage par brasage sous vide. Cette maîtrise est très délicate à atteindre afin de ne pas boucher les canaux de liaison. Par ailleurs, dans cette demande de brevet, il n'est pas prévu d'intégration de média poreux au niveau de la zone de transition liquide-vapeur.

[0057] Par conséquent, il existe un besoin pour améliorer encore les caloducs à rainures, plus particulièrement les caloducs à rainures réentrantes, et ce afin d'en optimiser le fonctionnement, d'améliorer leurs performances et d'étendre leurs domaines de fonctionnement, plus particulièrement d'augmenter la limite d'ébullition sans que cela se fasse au détriment d'autres caractéristiques, notamment la limite de pompage capillaire.

[0058] Le but général de l'invention est alors de répondre au moins en partie à ce besoin.

### **Exposé de l'invention**

[0059] Pour ce faire, l'invention a tout d'abord pour objet un caloduc à 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'évaporateur comprenant un canal vapeur, au moins un canal liquide relié au canal vapeur en définissant au moins une interface liquide-vapeur, et une pluralité de montants formant des piliers de conduction thermique qui s'étendent au moins dans le canal vapeur selon une deuxième direction (Y) orthogonale à la première direction (X), depuis une face latérale de l'enceinte à partir de laquelle le flux provenant de la source chaude est appliqué, jusqu'à l'interface liquide-vapeur.

- [0060] Selon une caractéristique avantageuse, chaque pilier de conduction thermique a au moins une forme rectiligne sur toute la hauteur du canal vapeur, selon la deuxième direction (Y). ***N.B : En réponse aux commentaires, on mentionne juste ici la forme générale sans mentionner la section transversale (uniforme, croissante ou décroissante).***
- [0061] Selon une variante avantageuse, chaque pilier de conduction thermique comprend une ou plusieurs branches formant une (des) ramification(s) qui s'étende(nt) de manière oblique depuis une portion centrale de la forme rectiligne jusqu'à l'interface liquide-vapeur. Ces ramifications peuvent constituer des piliers raidisseurs. Selon leur dimensionnement et configuration, ils peuvent permettre de s'affranchir de tout raidisseur dans le canal liquide.
- [0062] Selon une autre variante avantageuse, la forme rectiligne de chaque pilier de conduction thermique présente une section transversale à la deuxième direction (Y), qui est décroissante depuis la face latérale de l'enceinte jusqu'à l'interface liquide-vapeur.
- [0063] Avantageusement, la section transversale est oblongue, avec la longueur de la section selon la première direction (X).
- [0064] Selon un premier mode de réalisation, le canal liquide est relié au canal vapeur par au moins un canal de liaison formant une rainure réentrante définissant l'interface liquide-vapeur.
- [0065] Selon ce premier mode, à partir d'un process d'empilement de plaques et d'assemblages entre elles, l'enceinte étanche comprend un empilement de plaques selon une troisième direction (Z), orthogonale aux première (X) et deuxième (Y) directions, dont deux plaques de fermeture et au moins un nombre de n modules les uns sur les autres avec n étant un entier supérieur ou égal à 1, chaque module comprenant au moins une plaque intercalaire entre les plaques de fermeture, la ou les plaques intercalaires comprenant au moins une première plaque intercalaire comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie un canal vapeur s'étendant le long de la

première direction (X) entre l'évaporateur et le condenseur, dans lequel la vapeur est destinée à circuler, et sur au moins un côté latéral de la fenêtre selon la deuxième direction (Y), au moins une structuration dont les bords délimitent en partie un canal liquide dans l'évaporateur et le condenseur, au moins une plaque intercalaire comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie le canal vapeur, au moins la première plaque intercalaire délimitant un canal de liaison formant la rainure rééentrante reliant le canal vapeur et le canal liquide au moins dans l'évaporateur, les structururations et plaques intercalaires des n modules définissant un unique canal vapeur dans lequel s'étendent les piliers de conduction thermique dans l'évaporateur jusqu'au canal de liaison et sur, le au moins un côté latéral du canal vapeur, un unique canal liquide au moins dans l'évaporateur.

- [0066] Selon ce premier mode, et une variante de réalisation avantageuse, le caloduc comprend des montants qui s'étendent dans la deuxième direction (Y) sur toute la hauteur du canal liquide unique au moins dans l'évaporateur, de sorte à constituer des piliers raidisseurs.
- [0067] Selon ce premier mode, et un procédé de réalisation alternatif, l'enceinte étanche, les piliers de conduction thermique, des structururations délimitant les rainures rééentrantes sont constitués par une pièce monobloc réalisée en fabrication additive métallique, notamment par frittage sélectif par laser.
- [0068] Selon un deuxième mode avantageux, l'évaporateur intègre un média poreux, le canal liquide étant relié au canal vapeur par au moins une partie des pores du média poreux définissant l'interface liquide-vapeur.
- [0069] De préférence la taille des pores du média poreux est comprise entre 100 et 200µm.
- [0070] Selon une variante de réalisation avantageuse, le média poreux présente une section transversale à la première direction longitudinale (X), notamment en U, E, en peigne, telle que ses bords latéraux recouvrent au moins partiellement les bords latéraux du canal liquide, en contact avec les parois latérales de l'enceinte étanche, le matériau constitutif du média poreux étant le même que celui de l'enceinte étanche, de préférence choisi parmi l'aluminium, le cuivre, le nickel, ou un alliage à base d'au moins deux de ceux-ci.
- [0071] Selon une caractéristique avantageuse, les piliers de conduction thermique sont imbriqués au moins en partie dans le média poreux.
- [0072] Selon ce deuxième mode, à partir d'un process d'empilement de plaques et d'assemblages entre elles, l'enceinte étanche comprenant un empilement de plaques selon une troisième direction (Z), orthogonale aux première (X) et deuxième (Y) directions, 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 inter-

calaires comprenant au moins une première plaque intercalaire comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie un canal vapeur s'étendant le long de la première direction (X) entre l'évaporateur et le condenseur, dans lequel la vapeur est destinée à circuler, et sur au moins un côté latéral de la fenêtre selon la deuxième direction (Y), au moins une structuration dont les bords délimitent en partie un canal liquide dans l'évaporateur et le condenseur, au moins une plaque intercalaire comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie le canal vapeur, au moins la première plaque intercalaire intégrant le média poreux dont la partie des pores définissant l'interface liquide-vapeur reliant le canal vapeur et le canal liquide au moins dans l'évaporateur, les structurations et plaques intercalaires des n modules définissant un unique canal vapeur dans lequel s'étendent les piliers de conduction thermique dans l'évaporateur jusqu'au média poreux et sur, le au moins un côté latéral du canal vapeur, un unique canal liquide au moins dans l'évaporateur.

- [0073] Selon ce deuxième mode, et un procédé de réalisation alternatif, l'enceinte étanche, les piliers de conduction thermique, le média poreux sont constitués par une pièce monobloc réalisée en fabrication additive métallique, notamment par frittage sélectif par laser.
- [0074] Avantageusement, les piliers de conduction thermique sont agencés en quinconce dans un plan YZ du canal vapeur. Un tel agencement permet de limiter les pertes de pression de la phase vapeur, i.e. dans le canal vapeur.
- [0075] Selon une variante avantageuse, au moins une partie des plaques intercalaires comprend, dans l'évaporateur une ou plusieurs fentes débouchantes qui s'étendent transversalement au canal de liaison, de préférence selon la troisième direction (Z). Ces fentes débouchantes augmentent encore les lignes triples au niveau des ménisques, afin de maximiser ces derniers.
- [0076] Avantageusement, la largeur d'une fente débouchante est sensiblement égale à celle d'un canal de liaison.
- [0077] Selon une configuration préférée, les structurations et plaques intercalaires des n modules définissent un unique canal vapeur et un unique canal liquide également dans le condenseur et dans la zone adiabatique (ZA) entre évaporateur et condenseur, le condenseur et la zone adiabatique comprenant en outre des montants qui s'étendent dans la deuxième direction (Y) sur toute la hauteur du canal liquide unique, de sorte à constituer des piliers raidisseurs.
- [0078] Selon une variante avantageuse, les structurations sont seulement d'un côté latéral de la fenêtre délimitant le canal vapeur.
- [0079] Avantageusement, la section transversale dans un plan YZ du canal vapeur et du canal liquide, de préférence rectangulaire, est constante sur toute la longueur du caloduc, la troisième direction (Z) étant orthogonale aux première (X) et deuxième (Y)

directions.

- [0080] L'invention a également pour objet un système comprenant :
- [0081] - une source froide (SF) ;
- [0082] - une source chaude (SC) et
- [0083] - au moins un caloduc à rainures réentrantes tel que décrit précédemment, le caloduc étant agencé de sorte que le flux de chaleur de la source chaude (SC) sur l'évaporateur étant sur au moins une face latérale de l'enceinte en regard du canal vapeur dans lequel les piliers de conduction thermique s'étendent, 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).
- [0084] Ainsi, l'invention consiste essentiellement à proposer un caloduc dont l'évaporateur est conçu pour transmettre directement par conduction la chaleur émise par la source chaude au moyen de piliers de conduction thermique dans le canal vapeur qui alimente au plus proche les lignes/points d'évaporation configurés aux interfaces liquide-vapeur (ménisques), et sans gêner la circulation du flux de vapeur.
- [0085] En alimentant ainsi directement par le flux thermique les points d'évaporation, on augmente la limite d'ébullition à l'évaporateur.
- [0086] Deux alternatives de mises en œuvre des interfaces liquide-vapeur sont envisagées, à savoir soit par rainure réentrantes, soit par un média poreux intégré directement dans l'évaporateur. Deux modes de fabrication sont applicables chacun pour les deux alternatives,
- [0087] Un premier mode de réalisation, qui peut être mis en œuvre 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. Le média poreux peut être inséré dans l'empilement avant l'étape d'assemblage proprement dite. Lorsqu'il est réalisé par brasage, un ajout préalable et local de brasure entre l'extrémité d'un pilier de conduction thermique et le media poreux est de préférence réalisé afin de permettre une optimisation de la transmission du flux thermique.
- [0088] Un deuxième mode de fabrication consiste à réaliser les différentes parois et structures, notamment les piliers de conduction thermique, et le cas échéant le média poreux par fabrication additive métallique 3D, notamment par frittage sélectif par laser. La fabrication additive métallique permet d'obtenir des sections de caloduc ayant des particularités techniques pour répondre aux contraintes fonctionnelles du caloduc final (contraintes mécaniques de tenue en pression et contraintes fonctionnelles pour la continuité fluidique des canaux liquides et vapeur) et permettant également un fonctionnement amélioré en termes de limites (visqueuse, sonique, d'entraînement, ca-

pillaire et d'ébullition). La publication [7] indique notamment une fabrication additive d'aluminium avec un média poreux dont les tailles de pores sont de 50 microns à plusieurs centaines de microns, ce qui permet la réalisation des designs proposés dans le cadre de l'invention.

[0089] L'invention apporte de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer ceux par rapport aux solutions selon l'état de l'art une augmentation de la limite d'ébullition, sans que cela nuise à la limite de pompage capillaire ni à la conductance thermique du caloduc.

[0090] 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**

[0091] [Fig.1] la [Fig.1] illustre la courbe délimitant le domaine de fonctionnement pour un exemple de caloduc à pompage capillaire.

[0092] [Fig.2] la [Fig.2] est une reproduction photographique d'un exemple de caloduc à rainures réentrantes à section transversale en Omega selon l'état de l'art.

[0093] [Fig.3A], [Fig.3B], [Fig.3C] les figures 3A, 3B, 3C sont des vues schématiques en coupe transversale et en détail montrant différentes situations d'ébullition qui ont lieu dans un évaporateur d'un caloduc selon la [Fig.2].

[0094] [Fig.4] la [Fig.4] est une vue schématique d'un caloduc à artère selon l'état de l'art.

[0095] [Fig.4A], [Fig.4B] les figures 4A et 4B sont des vues en coupe transversale de la [Fig.4], respectivement au niveau de l'évaporateur et du condenseur du caloduc à artère selon l'état de l'art.

[0096] [Fig.5] la [Fig.5] est une vue en coupe transversale d'une variante de caloduc à artères selon l'état de l'art.

[0097] [Fig.6] la [Fig.6] est une vue schématique de côté d'un caloduc à rainures réentrantes, selon un premier mode de l'invention.

[0098] [Fig.6A] la [Fig.6A] est une vue en coupe transversale de la [Fig.6], réalisée au niveau de l'évaporateur du caloduc.

[0099] [Fig.7] la [Fig.7] est une vue de côté d'une plaque métallique intercalaire pour la réalisation par empilement et assemblage de plaques, d'un caloduc à rainures réentrantes selon le premier mode de l'invention.

[0100] [Fig.8] la [Fig.8] est une vue en perspective d'une partie de la plaque intercalaire de la [Fig.7], au niveau de l'évaporateur.

[0101] [Fig.9] la [Fig.9] est une vue partielle en perspective d'un empilement de plaques métalliques assemblées pour la réalisation d'un caloduc à rainures réentrantes selon le premier mode de l'invention.

[0102] [Fig.10] la [Fig.10] illustre, en vue partielle en coupe longitudinale et de dessus,

d'une variante d'agencement de piliers de conduction thermique au sein d'un caloduc à rainures réentrantes selon le premier mode de l'invention.

- [0103] [Fig.11] la [Fig.11] illustre, en vue partielle en perspective, un caloduc à rainures réentrantes avec les piliers de conduction thermique selon la variante de la [Fig.10].
- [0104] [Fig.12] la [Fig.12] illustre, en vue partielle en perspective, une partie d'une plaque intercalaire selon une variante avec fentes débouchantes, au niveau de l'évaporateur.
- [0105] [Fig.13] la [Fig.13] est une vue partielle en perspective, d'un empilement de plaques métalliques assemblées pour la réalisation d'un caloduc à rainures réentrantes selon la variante de la [Fig.12].
- [0106] [Fig.14] la [Fig.14] est une vue de détail et de dessus qui montre le croisement de fentes débouchantes selon les figures 12 et 13 avec les rainures réentrantes au sein de l'évaporateur.
- [0107] [Fig.15] la [Fig.15] illustre, en vue partielle en perspective une partie d'une plaque intercalaire selon une variante de piliers de conduction thermique avec des branches formant des ramifications, au niveau de l'évaporateur.
- [0108] [Fig.16] la [Fig.16] est une vue partielle en perspective, un empilement de plaques métalliques assemblées pour la réalisation d'un caloduc à rainures réentrantes selon la variante de la [Fig.15].
- [0109] [Fig.17] la [Fig.17] est une vue en coupe transversale, réalisée au niveau de l'évaporateur du caloduc à média poreux, selon un deuxième mode de l'invention.
- [0110] [Fig.18] la [Fig.18] est une vue partielle en perspective d'un empilement de plaques métalliques assemblées pour la réalisation d'un caloduc à média poreux selon le deuxième mode de l'invention.
- [0111] [Fig.18A] la [Fig.18A] est une vue de détail de la [Fig.18] montrant des zones de brasure locale pour la jonction entre média poreux et les piliers de conduction thermique, selon une première variante de réalisation.
- [0112] [Fig.19A], [Fig.19B] les figures 19A, 19B sont des vues de détail d'un média poreux, respectivement usiné avec ses empreintes et après, avec des disques de métal pour réaliser des brasures locales avec des piliers de conduction thermique, selon une deuxième variante de réalisation.
- [0113] [Fig.20] la [Fig.20] est une vue en coupe transversale, réalisée au niveau de l'évaporateur du caloduc à média poreux, selon le deuxième mode de l'invention et selon une variante où le média présente des bords latéraux configurés pour épouser ceux de l'enceinte étanche du caloduc.
- [0114] [Fig.21] la [Fig.21] est une vue en perspective du média poreux selon la [Fig.20].
- [0115] [Fig.22] la [Fig.22] illustre, en vue partielle en perspective, une partie d'une plaque intercalaire mise en œuvre avec le média poreux selon la [Fig.21].
- [0116] [Fig.23], [Fig.24] les figures 23 et 24 sont des vues partielles en perspective, d'un

empilement de plaques métalliques assemblées pour la réalisation d'un caloduc à média poreux selon la variante des figures 21 et 22.

[0117] [Fig.25A], [Fig.25B], [Fig.25C] les figures 25A, 25B, 25C sont des vues en coupe transversale, réalisée au niveau de l'évaporateur du caloduc à média poreux, illustrant des variantes de formes du média.

[0118] [Fig.26] la [Fig.26] est une vue en perspective et en coupe transversale, réalisée au niveau de l'évaporateur d'un caloduc à média poreux, selon le deuxième mode de l'invention, réalisé par fabrication additive métallique.

[0119] [Fig.26A] la [Fig.26A] est une vue en perspective et en coupe longitudinale de la [Fig.26].

[0120] [Fig.27] la [Fig.27] est une vue en perspective d'un exemple de pilier de conduction thermique selon l'invention réalisé par fabrication additive métallique.

### **Description détaillée**

[0121] Les figures 1 à 5 ont déjà été commentées en préambule. Elles ne sont pas détaillées ci-après.

[0122] Par souci de clarté, un même élément selon l'art antérieur et l'invention est désigné par la même référence numérique.

[0123] 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.

[0124] Sur les figures 6 et 6A, on peut voir un exemple de caloduc 1 à pompage capillaire à rainures réentrantes selon l'invention.

[0125] Sur la [Fig.6], l'exemple de caloduc 1 à pompage capillaire s'étendant selon un axe longitudinal X est vu de l'extérieur.

[0126] 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  $Z_C$ .

[0127] L'enceinte étanche 2 délimite intérieurement une zone adiabatique  $Z_A$  entre l'évaporateur et le condenseur.

[0128] 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...

- [0129] Selon un premier mode de l'invention, l'enceinte étanche 2 est réalisée par empilement et assemblage de plaques d'extrémité et de modules de plaques intercalaires 20 agencés entre les plaques d'extrémité 22, selon un procédé décrit dans la demande de brevet EP3553445.
- [0130] Un module comprend au moins deux plaques intercalaires, les plaques des différents modules de plaques intermédiaires 20 comprenant des fenêtres ou d'autres structurations, 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.
- [0131] La réalisation, l'empilement et l'assemblage des plaques ne sont pas détaillés ici, on pourra se reporter à la demande précitée EP3553445. Néanmoins, les plaques 20 sont préférentiellement en alliage d'aluminium et assemblées par brasure sous vide.
- [0132] Un mode de réalisation préférentiel consiste à usiner des plaques 20 claddées sur leurs deux faces principales, puis réaliser l'assemblage de ces tôles par brasure eutectique sous vide. A titre de variante, on peut réaliser un usinage sur une seule face principale des plaques claddées.
- [0133] 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...
- [0134] 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.
- [0135] 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.
- [0136] Par exemple, des fenêtres sont réalisées par poinçonnage, découpage, par exemple au laser ou au jet d'eau.
- [0137] 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.
- [0138] L'empilement de plaques 20 avec leurs fenêtres ou leurs structurations 12, 15, 16, délimite intérieurement, dans l'évaporateur  $Z_E$ , un canal liquide 11, un canal vapeur 13 relié au canal liquide 11 par des canaux de liaison 12.
- [0139] 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  $Z_A$ .

- [0140] 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  $Z_E$ .
- [0141] Un canal de liaison 12 forme une rainure réentrante en définissant une zone d'échange entre la vapeur et le liquide. Autrement dit, un canal de liaison 12 définit au moins une interface liquide-vapeur.
- [0142] Selon ce premier mode, dans l'évaporateur, une pluralité de montants 15 formant des piliers de conduction thermique s'étendent dans le canal vapeur 13 selon la deuxième direction (Y), depuis une face latérale 21 de l'enceinte à partir duquel le flux provenant de la source chaude SC est appliqué, jusqu'à l'interface liquide-vapeur. De fait, ces piliers de conduction thermique 15 régulièrement espacés les uns des autres assurent, outre leur fonction de conduction du flux thermique provenant de la source chaude SC depuis la face latérale 21 de l'enceinte, une fonction de raidisseur de chaque plaque intercalaire 20 et donc de tenue mécanique de l'enceinte 2.
- [0143] Autrement dit, l'interface liquide-vapeur est assurée selon ce premier mode par les rainures réentrantes 12. Ces rainures réentrantes 12 sont chacune délimitées par des structurations 16 de deux plaques adjacentes 20, auxquelles sont reliés les piliers de conduction thermique 15.
- [0144] Comme illustré en [Fig.6A], les piliers de conduction thermique 15 alimentent chacun en flux thermique selon les lignes L directement les ménisques constituant les interfaces liquide- vapeur tout en laissant s'échapper, dans le canal vapeur 13, le flux de vapeur venant d'être évaporé au niveau des lignes/points triples P.
- [0145] L'enceinte 2 peut en outre intégrer des montants ou piliers 17 qui s'étendent dans la deuxième direction (Y) sur toute la hauteur du canal liquide unique 11, de sorte à constituer des piliers raidisseurs 17. Ces piliers 17 participent ainsi également au maintien mécanique de l'enceinte monobloc 2.
- [0146] Comme montré à la [Fig.7], ces piliers raidisseurs 17 peuvent non seulement être implantés dans l'évaporateur  $Z_E$  mais également dans la zone adiabatique  $Z_A$  ou au condenseur  $Z_C$  du caloduc 1, c'est-à-dire sur toute la longueur de l'enceinte 2. Comme montré également sur cette [Fig.7], ces piliers 17 sont positionnés le plus décalés possible par rapport à deux piliers de conduction thermique 15, de manière à éviter qu'une partie du flux thermique soit drainée justement par ces piliers 17 vers le canal liquide. De préférence, comme illustré, ces piliers raidisseurs 17 sont aussi moins nombreux que les piliers de conduction thermique 15.

- [0147] Un agencement relatif entre piliers de conduction thermique 15 et piliers raidisseur 17 au sein d'une même plaque intercalaire 20 est illustré en [Fig.8].
- [0148] Sur cette [Fig.8], on voit également le décalage  $e/2$  des structurations 16 par rapport au bord longitudinal d'une plaque 20, selon la direction d'empilement Z des plaques 20. Ce décalage  $e/2$  permet de calibrer l'ouverture d'un canal de liaison 12, égal donc à  $e$ , c'est-à-dire à deux fois le décalage de deux plaques empilées l'une sur l'autre. La maîtrise, le cas échéant par usinage de cette valeur  $e/2$  permet de contrôler la limite capillaire du caloduc 1, qui est la limite la plus contraignante sur une majorité de la plage de température de fonctionnement, avec un impact direct pour la puissance transmissible en W.m par le caloduc.
- [0149] La [Fig.9] illustre l'intérieur d'une enceinte 2 de caloduc 1 (une plaque de fermeture 22 étant omise), une fois réalisé l'empilement de plaques intercalaires 20 et leur assemblage avec deux plaques de fermeture 22. La densité et la forme des piliers de conduction thermique 15 dans l'évaporateur  $Z_E$  peuvent être ajustées en fonction du compromis à atteindre, perte de limite capillaire (plus de perte de pression du côté du canal vapeur 13) et gain sur la limite d'ébullition, qui est parfois prédominante dans des conditions opératoires vis-à-vis des autres limites.
- [0150] Dans l'exemple illustré aux figures 7 à 13, chaque pilier de conduction thermique 15 présente une forme rectiligne sur toute la hauteur du canal vapeur 13 et une section transversale à la deuxième direction (Y), qui est décroissante depuis la face latérale 21 de l'enceinte jusqu'à l'interface liquide-vapeur. Cette section transversale est oblongue avec la longueur de la section selon la première direction (X). On peut bien entendu envisager d'autres types de section transversale et de forme, en tenant compte des contraintes de réalisation, notamment d'usinage. Par exemple, on peut envisager des formes rectilignes à section transversale carrée, qui sont à priori plus facilement usinables, mais plus génératrices de perte de pression.
- [0151] Les figures 10 et 11 montrent un agencement avantageux des piliers de conduction thermique 15, selon lequel ils sont en quinconce dans un plan YZ du canal vapeur 13 de l'évaporateur  $Z_E$  de l'enceinte 2. Pour réaliser cet agencement en quinconce, on peut empiler des plaques intercalaires 20 en alternance avec des décalages entre les piliers 15 d'une plaque à l'autre adjacente. Cet agencement est avantageux pour limiter les pertes de pression de la phase vapeur.
- [0152] Les figures 12 et 13 illustrent une variante avantageuse où des fentes débouchantes 18 s'étendent transversalement au canal de liaison 12 selon la troisième direction (Z). La largeur d'une fente débouchante 18 est sensiblement égale à celle d'un canal de liaison 12. Ces fentes débouchantes permettent de maximiser les lignes triples au niveau des ménisques à l'interface vapeur-liquide. Typiquement, avec les fentes débouchantes 18 comme illustrées, on peut envisager une augmentation de plus de 20%

de longueur des lignes triples.

- [0153] La [Fig.14] illustre une caractéristique avantageuse à mettre en œuvre au niveau des intersections entre canaux de liaison 12 et des fentes débouchantes 18. En effet, la dimension maximale  $d$  d'ouverture d'un canal de liaison 12, qui est donc la valeur de la diagonale au niveau d'une intersection, conditionne la performance capillaire du caloduc. Pour maintenir cette dimension  $d$  à une valeur égale dans le reste de l'évaporateur, il est nécessaire de réaliser des surépaisseurs des structurations 16, qui sont symbolisées par les portions de matière au-delà des traits en pointillés sur la [Fig.14].
- [0154] Comme illustré aux figures 15 et 16, les piliers de conduction thermique 15 peuvent avoir une forme rectiligne avec des branches 19 formant des ramifications qui s'étendent de manière oblique depuis une portion centrale de la forme rectiligne jusqu'à l'interface liquide-vapeur. Cette variante permet d'assurer une transmission du flux plus homogène à l'interface liquide-vapeur où se trouvent les lignes triples au niveau des ménisques, vis-à-vis d'une configuration à iso nombre de piliers 15 de forme rectiligne comme illustrés selon les figures 8 à 13.
- [0155] Il est possible suivant les contraintes de dimensionnement du caloduc et de son évaporateur  $Z_E$ , de déterminer un optimum entre l'homogénéité du flux thermique transmis aux interfaces liquide-vapeur et les pertes de charges dans le canal vapeur 13 engendrées par les piliers 15 et leurs ramifications 19.
- [0156] Les variantes à fentes débouchantes 18 et piliers à ramifications 19 peuvent être combinées entre elles avec la présence de rainures réentrantes, ce qui permet de démultiplier encore les longueurs de ligne triple. Typiquement, avec des fentes débouchantes 18 et piliers à ramifications 19, on peut envisager une augmentation de plus de 40% de longueur des lignes triples.
- [0157] Comme montré aussi aux figures 15 et 16, prévoir des ramifications 19 qui peuvent servir de raidisseurs en tant que tels peut permettre de s'affranchir de la présence de piliers raidisseurs 17 dans le canal liquide 11.
- [0158] A l'instar de ce qui est illustré aux figures 10 et 11 avec des piliers de conduction thermique 15 de forme rectiligne, on peut aussi agencer en quinconce des piliers 15 avec ramifications 19 dans un plan YZ du canal vapeur 13 de l'évaporateur  $Z_E$  de l'enceinte 2. Pour réaliser cet agencement en quinconce, on peut empiler des plaques intercalaires 20 en alternance avec des décalages entre les piliers 15 à ramifications 19 d'une plaque à l'autre adjacente. Cet agencement est aussi avantageux pour limiter les pertes de pression de la phase vapeur.
- [0159] La [Fig.17] illustre la mise en œuvre de l'interface liquide-vapeur par un média poreux 5 en lieu et place de rainures réentrantes 12. Les pores du média poreux 5 ont une taille sensiblement égale à la largeur d'une rainure réentrante 12. Elle peut être

comprise entre plusieurs dizaines de microns à quelques centaines de microns, de préférence entre 100 et 200 $\mu\text{m}$ .

- [0160] Le principal avantage d'implanter un média poreux 5 en lieu et place de rainures ré-entrantes pour assurer l'interface liquide-vapeur est de démultiplier les lignes triples tout en gardant un potentiel de pompage capillaire fort. Cette augmentation de lignes triples permet d'améliorer le processus d'évaporation et de réduire la résistance thermique locale à l'évaporation.
- [0161] De plus, en intégrant un milieu poreux 5 d'une certaine épaisseur, on augmente la capacité d'accommodation aux variations de volume de liquide, qui sont fonction des variations des puissances thermiques mises en jeu et de la température opératoire du caloduc, tout en évitant le désamorçage du caloduc. On précise ici que le désamorçage est la conséquence des variations de conditions opératoires du caloduc, c'est-à-dire les variations de température et de puissance. En effet, suivant la masse de fluide initiale, et une masse volumique du fluide de travail (phases liquide et vapeur) changeant en fonction de la température, le volume du fluide change également. De plus, la forme du ménisque et sa position dans le canal de liaison évoluent suivant la direction longitudinale X du caloduc : à l'évaporateur, c'est le point où la différence de pression entre phases liquide et vapeur est maximale, et où le ménisque se creuse et recule le plus. Si ce volume de fluide de travail, devient trop faible, potentiellement, si le canal de liaison 12 et/ou le média poreux 5 sont trop courts ou trop minces, le ménisque peut se décrocher du canal de liaison ou du media poreux. Ce décrochage est un désamorçage.
- [0162] Comparé à une configuration précédemment décrite avec des canaux de liaison 12 formant les rainures réentrantes, le volume mis en jeu dans un media poreux 5 est bien plus important.
- [0163] La mise en œuvre d'un tel média poreux 5 doit être faite de sorte à s'assurer d'un très bon contact thermique entre les piliers de conduction thermique 15 et la matière du média au niveau de leurs zones de contact.
- [0164] Pour ce faire, il est nécessaire de faire un ajout local de brasure entre l'extrémité d'un pilier de conduction thermique 15 et le média poreux 5. Cet ajout local de brasure peut être fait, avant de mettre l'assemblage de plaques 20, 22 empilée dans un four de brasage sous vide.
- [0165] Deux variantes peuvent être envisagées pour cet ajout local de brasure.
- [0166] La première variante consiste à déposer de la brasure, dans le même métal eutectique que celui des plaques 20 sous forme d'un cordon autour de l'extrémité de chaque pilier 15. De ce fait, le média poreux 5 est positionné au début de l'empilement des plaques 20, 22. A chaque plaque 20 empilée, on dépose de la brasure à l'interface entre l'extrémité d'un pilier 15 et le média poreux 5. Lors du brasage, la brasure, du fait du milieu poreux du média 5 va se répandre localement et assurer un bon contact

mécanique et thermique entre le média 5 poreux et le pilier 15.

- [0167] Les figures 18 et 18A illustrent le dépôt local des brasures B sous la forme d'un cordon et le maintien global du média poreux 5 dans l'évaporateur Z<sub>E</sub>. L'épaisseur de métal de brasure B déposée localement sur une extrémité d'un pilier 15 est avantageusement inférieure à 100µm, de telle sorte à ce que la migration de la brasure dans le média poreux 5 soit minimale. De préférence, cette épaisseur de cordon B est comprise entre 10 et 100µm suivant les propriétés du média poreux 5, notamment en fonction de la taille moyenne de ses pores et de son taux de vide. La brasure B peut être initialement sous forme d'un feuillard métallique identique à celui des plaques claddées 20, 22.
- [0168] Une deuxième variante est illustrée aux figures 19A et 19B. Le média poreux 5 est usiné de telle sorte à réaliser des empreintes 50, de préférence sous la forme de disques, des piliers de conduction thermique, là où le contact avec le média poreux 5 est requis. La profondeur d'une empreinte 50 est de préférence égale à l'épaisseur d'une feuille métallique, typiquement d'une à plusieurs centaines de microns. Dans chaque empreinte 50, est introduit en force un disque métallique 51 avant l'empilement des plaques 20, 22 et leur assemblage dans un four de brasage sous vide.
- [0169] Comme illustré aux figures 20 et 21, le média poreux 5 est une pièce usinée dont la section transversale dans le plan YZ est une forme de U.
- [0170] Les usinages permettent au flux de liquide de migrer facilement dans la canal liquide 11 et d'imprégner le média poreux 5 efficacement.
- [0171] En outre, les branches latérales 52 du U du média poreux usiné 5 permettent, en plus d'assurer une fonction de maintien mécanique, de récupérer les lignes de flux thermique L de pertes par les côtés de l'enceinte 2. Ainsi, les branches 52 permettent de transmettre ces lignes de pertes L directement à la phase liquide contenue dans le canal 11 dernier, ce qui contribue également à améliorer la fonction évaporation et éloigner la limite d'ébullition du caloduc 1.
- [0172] Les figures 22 à 24 illustrent un exemple respectivement de plaque intercalaire 20 qui convient à une intégration d'un tel média poreux 5 en U, et d'assemblage des plaques 20 obtenu avec ce média 5.
- [0173] D'autres sections transversales que le U illustré à la [Fig.25A] peuvent être envisagées pour le média poreux 5 : il peut s'agir d'une forme générale en E ([Fig.25B]) ou en peigne ([Fig.25C], avec toujours les branches latérales 52 qui sont en contact et recouvrent les bords latéraux des plaques de fermeture 22 pour récupérer les lignes de flux thermique provenant de la face 21 soumise à la source de chaleur et les amener directement dans le canal liquide 11.
- [0174] Les figures 26 à 27 illustrent un caloduc 1 selon l'invention, réalisé non pas par empilement et assemblages de plaques 20, 22 comme décrit précédemment mais par fa-

brication additive métallique 3D. Ici, l'évaporateur de l'enceinte 2 intègre, en tant que piliers de conduction thermique 15, des profils de forme tridimensionnelle ramifiées 19 et un média poreux 5 en forme de U. L'enceinte 2, les piliers 15 avec leurs ramifications tridimensionnelles 19 et le média poreux 5 sont constitués par une seule et même pièce monobloc issue de la fabrication additive ou fabrication 3D.

- [0175] Par exemple, la pièce peut être fabriquée par le procédé de fusion par lit de poudre dans lequel une zone d'une couche de matériau en poudre est fondue dans une zone donnée au moyen d'un faisceau laser ou d'un faisceau d'électrons. Puis une nouvelle couche de matériau en poudre est déposée, qui sera ensuite fondue dans une zone donnée. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que la pièce soit terminée. Les couches ont une épaisseur comprise par exemple entre 20  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ , et les particules du matériau en poudre ont un diamètre compris par exemple entre 10  $\mu\text{m}$  et 50  $\mu\text{m}$ . Une épaisseur minimale de paroi de l'ordre de 0,4 mm peut être atteinte par ce procédé.
- [0176] En variante, la pièce peut être fabriquée par dépôt de matériau et fusion ou DED (« *Direct Energy Deposition* » en terminologie anglo-saxonne). Un matériau est apporté sous forme de poudre ou de fil, celui-ci est fondu par une source à haute énergie. Le matériau est déposé sélectivement couche par couche sur un substrat, par exemple guidé par un bras robotisé multi-axes et ensuite fini par un usinage par commande numérique pour fondre le matériau. L'énergie thermique est générée soit par laser, soit par un faisceau d'électrons, soit par un gaz ionisé. Le matériau est directement projeté dans la zone chauffée où il fond.
- [0177] En variante, le module peut être fabriqué par le procédé dit de Jet de liant (« *Binder Jetting* » en terminologie anglo-saxonne) dans lequel des liants sont projetés sélectivement sur le lit de poudre, liant ces zones ensemble pour former une partie solide, une couche à la fois. Un post-traitement thermique, par exemple un frittage, a ensuite lieu pour éliminer le liant et créer une pièce entièrement métallique.
- [0178] En variante, la pièce peut être fabriquée par extrusion de métal, dans lequel un filament ou une tige constitué d'un polymère et fortement chargé de poudre métallique est extrudé à travers une buse (comme dans le procédé FDM) pour former la partie «verte» qui est post-traitée, par exemple en réalisant une étape d'ébavurage et une étape de frittage, pour créer une pièce entièrement métallique.
- [0179] En variante encore, la pièce peut être réalisée par fabrication additive ultrasonique. Pour cela des feuilles métalliques sont collées couche par couche à l'aide d'un soudage par ultrasons, puis formées à la forme souhaitée à l'aide d'un usinage à contrôle numérique. La pièce est modélisée par CAO, cette modélisation est ensuite utilisée dans la machine de fabrication par méthode additive pour diriger le faisceau laser. Comme préconisé par les auteurs de la publication [7], la réalisation par fabrication additive des différents éléments et notamment des piliers 15 et des canaux 11,

13 nécessite un intervalle minimum entre deux éléments adjacents, afin d'éviter la fusion de surfaces en vis-à-vis. Typiquement, cet intervalle minimum est égal à 0,3mm.

[0180] Les formes qu'il est possible d'obtenir avec la fabrication additive pour un caloduc 1 selon l'invention, tel qu'illustré aux figures 26 à 27 permettent un très bon compromis en termes d'homogénéité du flux thermique au niveau des interfaces liquide-vapeur, de poids et de pertes de pression du côté du canal vapeur 13.

[0181] Ceci s'applique pour des interfaces liquide-vapeur qui sont assurées par :

- des rainures réentrantes 12 où se développent les lignes triples et le cas échéant dans des fentes traversantes 18 ;
- un média poreux 5 avec des ramifications 19 de piliers 15 qui peuvent s'imbriquer à l'intérieur même du média, ce qui apporte une plus-value considérable pour l'homogénéité du flux dans ledit média poreux 5.

[0182] D'autres avantages et améliorations pourront être apportés sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

[0183] 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.

[0184] 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.

[0185] 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.

[0186] A titre d'exemple, pour un caloduc selon l'invention réalisé en alliage d'aluminium en nickel, en cuivre, en titane ou en alliage à base d'une combinaison d'entre eux, qui est soit assemblé par brasure eutectique, soit réalisé par fabrication additive métallique, on peut utiliser comme fluide l'ammoniac, l'eau, l'acétone, le méthanol, ....

[0187] Du fait des limites d'utilisation, entre les fluides de travail et les métaux cités, les couples envisagés peuvent être comme suit :

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

|     |                        |
|-----|------------------------|
| Eau | Cuivre, nickel, titane |
|-----|------------------------|

### Liste des références citées

- [0188] [1]: Christine Hoa :«*Thermique des caloducs à rainures axiales : études et réalisations pour des applications spatiales*». Université de Poitiers, 2004.
- [0189] [2]: Jocelyn Bonjour, et al.: «*Systèmes diphasiques de contrôle thermique - Boucles capillaires et gravitaires* ». Techniques de l'ingénieur BE9546 v1 (2011).
- [0190] [3]: Lizhan Bi,Lanpei et al.: «*Pool boiling with high heat flux enabled vapours artery structure*» Appl. Phys. Lett. 108,23901 (2016); <https://doi.org/10.1063/1.495374>.
- [0191] [4]: Kai Zhu et al.: «*Operation characteristics of a new-type loop heat pipe (LHP) with wick separated from heating surface in the evaporator* ». Applied Thermal Engineering 123 (2017) 034–1041.
- [0192] [5]: Eric A.Silk et al.: «*Fractal Loop Heat Pipe performance testing with a compressed carbon* ». Applied Thermal Engineering 59 (2013) 290e297.
- [0193] [6]:  
<https://www.1-actom/case-wtudies/high-heat-flux-50-w-cm2-hybrid-constant-conductance-heat-pipes/>
- [0194] [7] : M. Ameli et al. : « *A novel method for manufacturing sintered aluminium heat pipes* », Applied Thermal Engineering 52 (2013) 498e504.

## Revendications

- [Revendication 1] Caloduc (1) 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 ( $Z_E$ ) et une deuxième extrémité longitudinale (4) destinée à être refroidie par une source froide SF pour former, au sein de l'enceinte, un condenseur ( $Z_C$ ), l'enceinte étanche délimitant une zone adiabatique ( $Z_A$ ) entre l'évaporateur et le condenseur, l'évaporateur comprenant un canal vapeur (13), au moins un canal liquide (11) relié au canal vapeur en définissant au moins une interface liquide-vapeur (I), et une pluralité de montants (15) formant des piliers de conduction thermique qui s'étendent au moins dans le canal vapeur selon une deuxième direction (Y) orthogonale à la première direction (X), depuis une face latérale (21) de l'enceinte à partir de laquelle le flux provenant de la source chaude est appliqué, jusqu'à l'interface liquide-vapeur.
- [Revendication 2] Caloduc (1) selon la revendication 1, chaque pilier de conduction thermique ayant au moins une forme rectiligne sur toute la hauteur du canal vapeur, selon la deuxième direction (Y).
- [Revendication 3] Caloduc (1) selon la revendication 2, chaque pilier de conduction thermique comprenant une ou plusieurs branches (19) formant une (des) ramification(s) qui s'étende(nt) de manière oblique depuis une portion centrale de la forme rectiligne jusqu'à l'interface liquide-vapeur.
- [Revendication 4] Caloduc (1) selon la revendication 2 ou 3, la forme rectiligne de chaque pilier de conduction thermique présentant une section transversale à la deuxième direction (Y), qui est décroissante depuis la face latérale de l'enceinte jusqu'à l'interface liquide-vapeur.
- [Revendication 5] Caloduc (1) selon la revendication 4, la section transversale étant oblongue avec la longueur de la section selon la première direction (X).
- [Revendication 6] Caloduc (1) selon l'une des revendications précédentes, le canal liquide étant relié au canal vapeur par au moins un canal de liaison formant une rainure réentrante définissant l'interface liquide-vapeur.
- [Revendication 7] Caloduc (1) à rainures réentrantes selon la revendication 6, l'enceinte étanche comprenant un empilement de plaques (20, 22) selon une troisième direction (Z), orthogonale aux première (X) et deuxième (Y) directions, 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 entre les plaques de fermeture (22), la ou les plaques intercalaires comprenant au moins une première plaque intercalaire (20) comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie un canal vapeur (13) s'étendant le long de la première direction (X) entre l'évaporateur et le condenseur, dans lequel la vapeur est destinée à circuler, et sur au moins un côté latéral de la fenêtre selon la deuxième direction (Y), au moins une structuration (16) dont les bords délimitent en partie un canal liquide dans l'évaporateur et le condenseur, au moins une plaque intercalaire comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie le canal vapeur (13), au moins la première plaque intercalaire délimitant un canal de liaison formant la rainure réentrante reliant le canal vapeur et le canal liquide au moins dans l'évaporateur, les structururations et plaques intercalaires des n modules définissant un unique canal vapeur dans lequel s'étendent les piliers de conduction thermique dans l'évaporateur jusqu'au canal de liaison et sur, le au moins un côté latéral du canal vapeur, un unique canal liquide au moins dans l'évaporateur.
- [Revendication 8] Caloduc (1) à rainures réentrantes selon la revendication 7, comprenant des montants (17) qui s'étendent dans la deuxième direction (Y) sur toute la hauteur du canal liquide unique au moins dans l'évaporateur, de sorte à constituer des piliers raidisseurs.
- [Revendication 9] Caloduc (1) à rainures réentrantes selon la revendication 6, l'enceinte étanche, les piliers de conduction thermique, des structururations délimitant les rainures réentrantes étant constitués par une pièce monobloc réalisée en fabrication additive métallique, notamment par frittage sélectif par laser.
- [Revendication 10] Caloduc (1) selon l'une des revendications 1 à 5, l'évaporateur intégrant un média poreux (5), le canal liquide étant relié au canal vapeur par au moins une partie des pores du média poreux définissant l'interface liquide-vapeur.
- [Revendication 11] Caloduc (1) à média poreux selon la revendication 10, la taille des pores du média poreux étant comprise entre 100 et 200 $\mu$ m.
- [Revendication 12] Caloduc (1) à média poreux selon la revendication 10 ou 11, le média poreux présentant une section transversale à la première direction longitudinale (X), notamment en U, E, en peigne, telle que ses bords latéraux recouvrent au moins partiellement les bords latéraux du canal liquide, en contact avec les parois latérales de l'enceinte étanche.
- [Revendication 13] Caloduc (1) à média poreux selon l'une des revendications 10 à 12, le

matériau constitutif du média poreux étant dans le même que celui de l'enceinte étanche, de préférence choisi parmi l'aluminium, le cuivre, le nickel, ou un alliage à base d'au moins deux de ceux-ci.

[Revendication 14] Caloduc (1) à média poreux selon l'une des revendications 10 à 13, les piliers de conduction thermique étant imbriqués au moins en partie dans le média poreux.

[Revendication 15] Caloduc (1) à média poreux selon l'une des revendications 10 à 14, l'enceinte étanche comprenant un empilement de plaques selon une troisième direction (Z), orthogonale aux première (X) et deuxième (Y) directions, 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 (22), la ou les plaques intercalaires comprenant au moins une première plaque intercalaire (20) comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie un canal vapeur (13) s'étendant le long de la première direction (X) entre l'évaporateur et le condenseur, dans lequel la vapeur est destinée à circuler, et sur au moins un côté latéral de la fenêtre selon la deuxième direction (Y), au moins une structuration (16) dont les bords délimitent en partie un canal liquide dans l'évaporateur et le condenseur, au moins une plaque intercalaire comportant au moins une fenêtre dont les bords délimitent en partie le canal vapeur (13), au moins la première plaque intercalaire intégrant le média poreux dont la partie des pores définissant l'interface liquide-vapeur reliant le canal vapeur et le canal liquide au moins dans l'évaporateur, les structururations et plaques intercalaires des n modules définissant un unique canal vapeur dans lequel s'étendent les piliers de conduction thermique dans l'évaporateur jusqu'au média poreux et sur, le au moins un côté latéral du canal vapeur, un unique canal liquide au moins dans l'évaporateur.

[Revendication 16] Caloduc (1) à média poreux selon l'une des revendications 10 à 14, l'enceinte étanche, les piliers de conduction thermique, le média poreux étant constitués par une pièce monobloc réalisée en fabrication additive métallique, notamment par frittage sélectif par laser.

[Revendication 17] Caloduc (1) selon l'une des revendications 7 à 8 ou selon la revendication 15, les piliers de conduction thermique étant agencés en quinconce dans un plan YZ du canal vapeur.

[Revendication 18] Caloduc (1) selon l'une des revendications 7 à 8, au moins une partie des plaques intercalaires comprenant, dans l'évaporateur une ou

- plusieurs fentes débouchantes (18) qui s'étendent transversalement au canal de liaison, de préférence selon la troisième direction (Z).
- [Revendication 19] Caloduc (1) à rainures réentrantes selon la revendication 18, la largeur d'une fente débouchante étant sensiblement égale à celle d'un canal de liaison.
- [Revendication 20] Caloduc selon l'une des revendications 7 à 8 ou selon la revendication 15, les structurations et plaques intercalaires des n modules définissant un unique canal vapeur et un unique canal liquide également dans le condenseur et dans la zone adiabatique (ZA) entre évaporateur et condenseur, le condenseur et la zone adiabatique comprenant en outre des montants (17) qui s'étendent dans la deuxième direction (Y) sur toute la hauteur du canal liquide unique, de sorte à constituer des piliers raidisseurs.
- [Revendication 21] Caloduc (1) selon l'une des revendications 7 à 8 ou selon la revendication 15, les structurations étant seulement d'un côté latéral de la fenêtre délimitant le canal vapeur.
- [Revendication 22] Caloduc selon l'une des revendications précédentes, la section transversale dans un plan YZ du canal vapeur et du canal liquide, de préférence rectangulaire, étant constante sur toute la longueur du caloduc, la troisième direction (Z) étant orthogonale aux première (X) et deuxième (Y) directions.
- [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 de la source chaude (SC) sur l'évaporateur étant sur au moins une face latérale (21) de l'enceinte (2) en regard du canal vapeur dans lequel les piliers de conduction thermique s'étendent, 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]

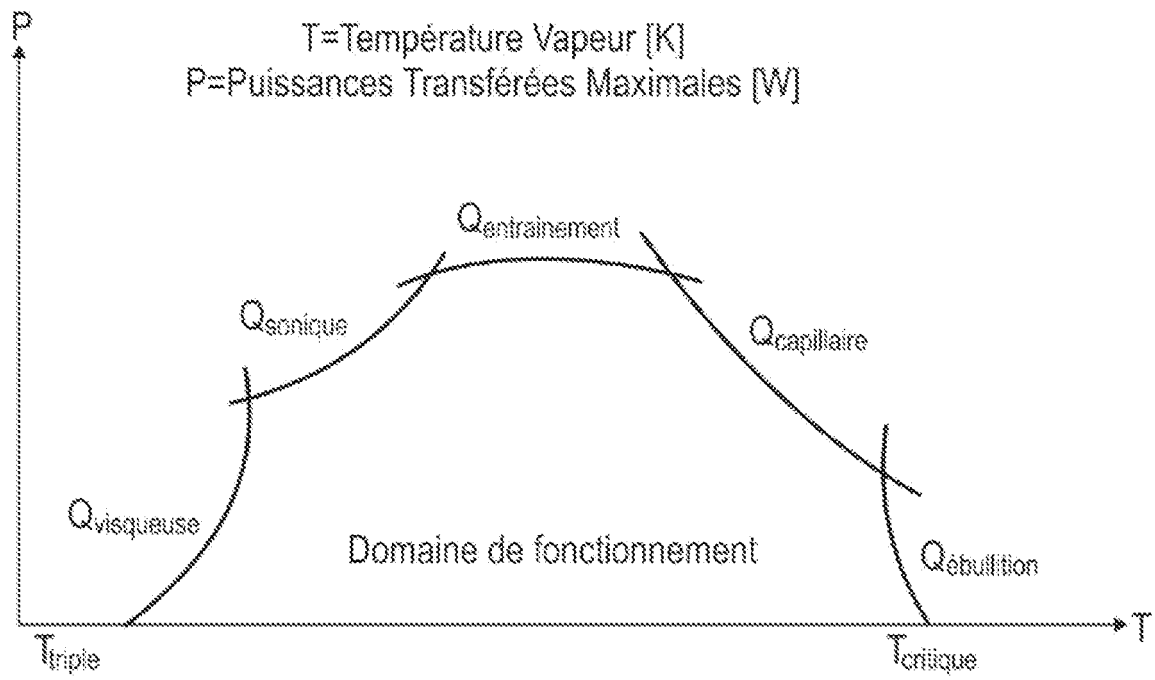
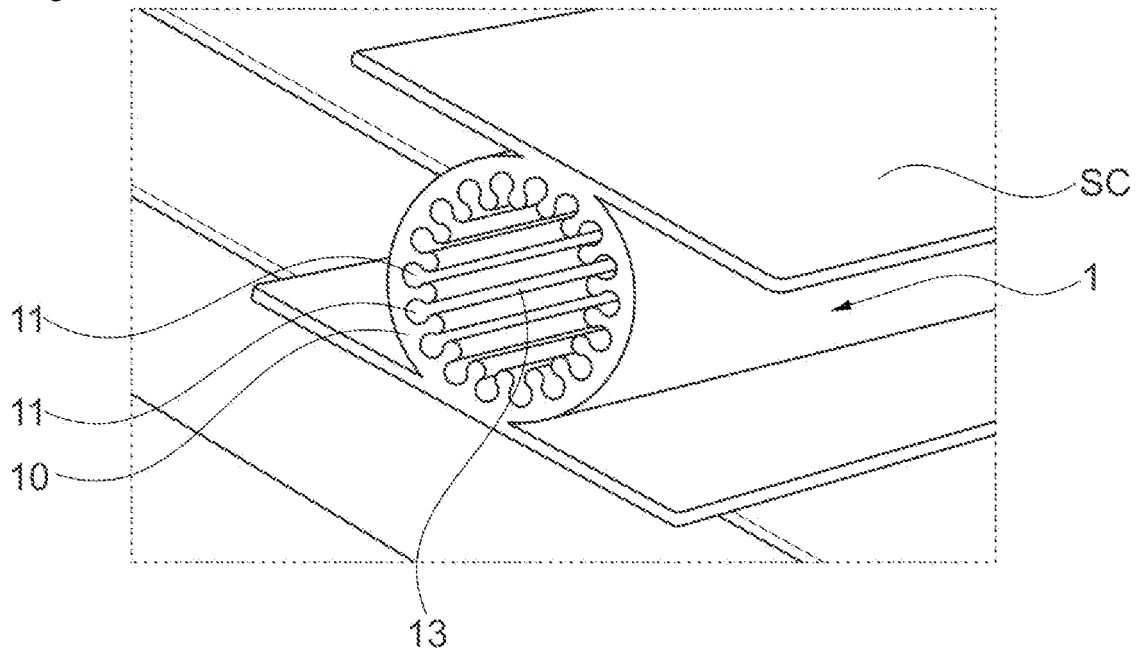
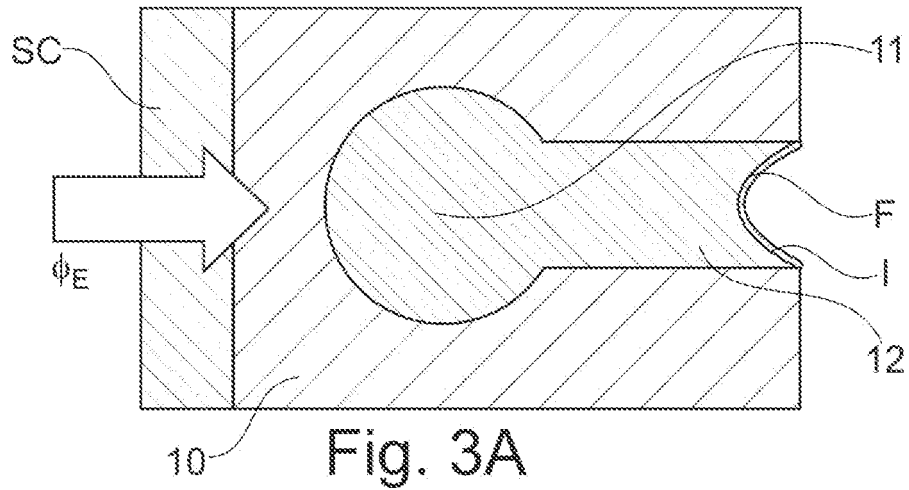


Fig. 1

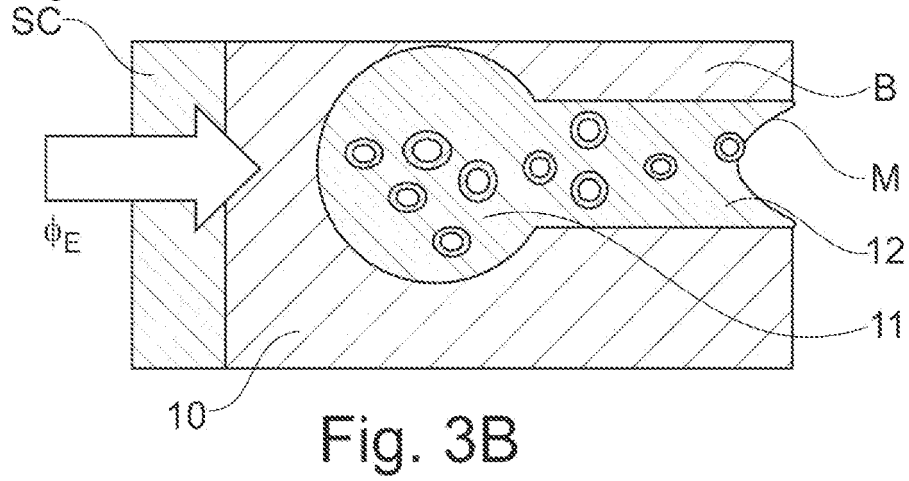
[Fig. 2]


 Fig. 2  
 (ETAT DE L'ART)

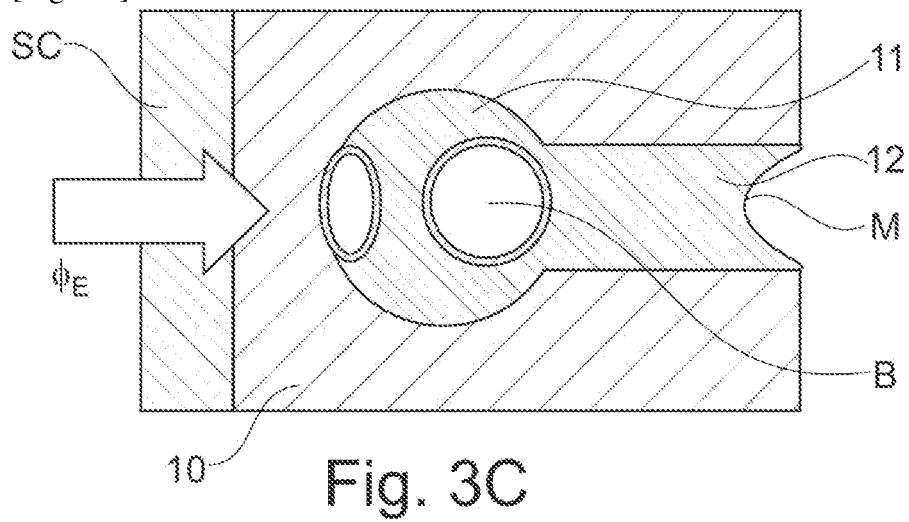
[Fig. 3A]



[Fig. 3B]



[Fig. 3C]



[Fig. 4]

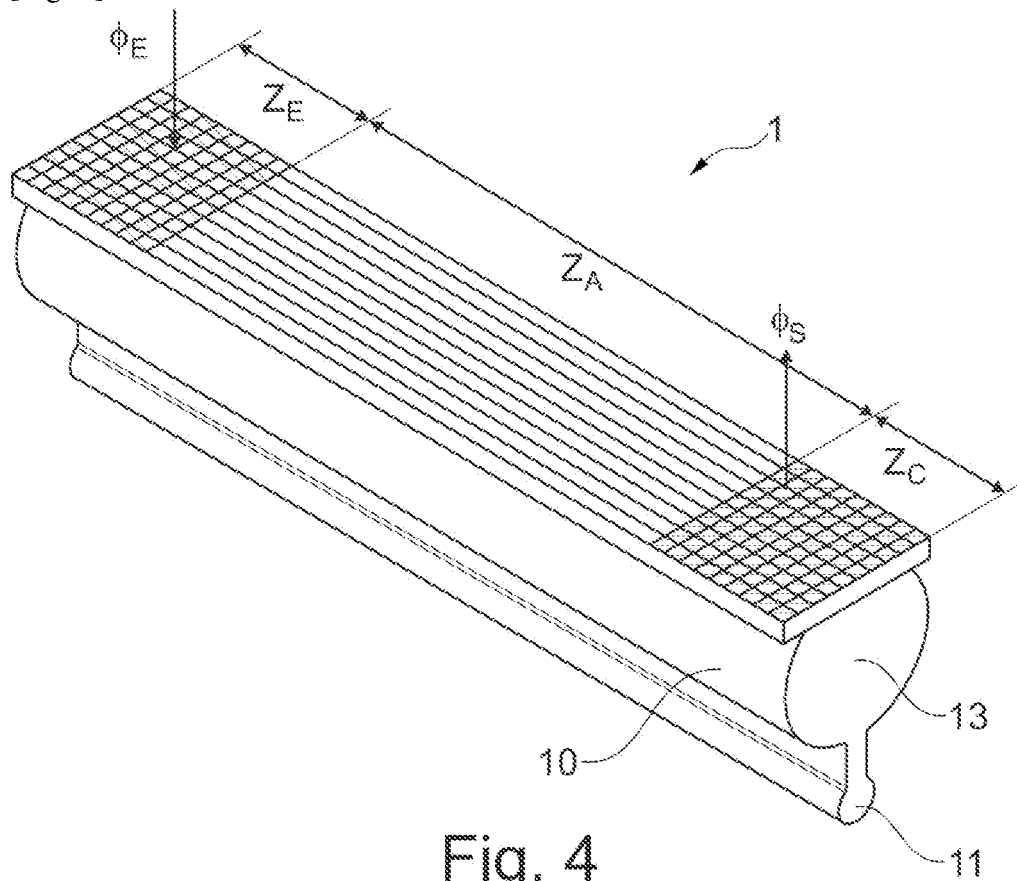


Fig. 4  
(ETAT DE L'ART)

[Fig. 4A]

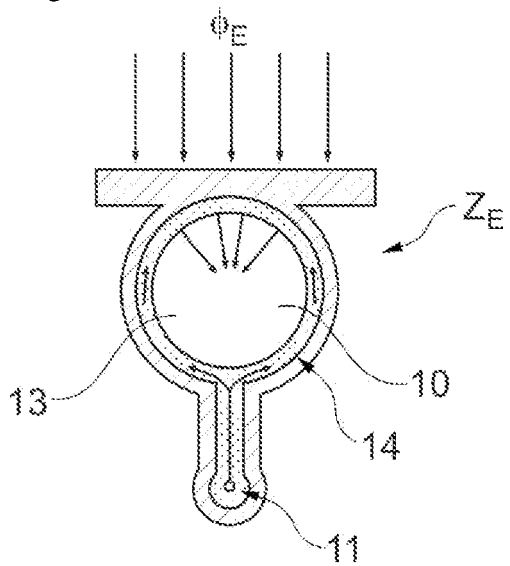


Fig. 4A

[Fig. 4B]

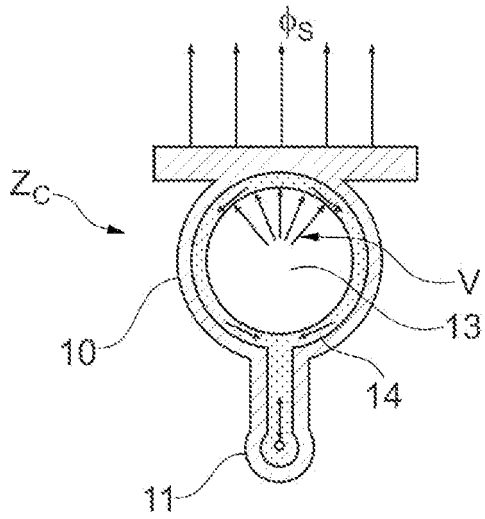


Fig. 4B

[Fig. 5]

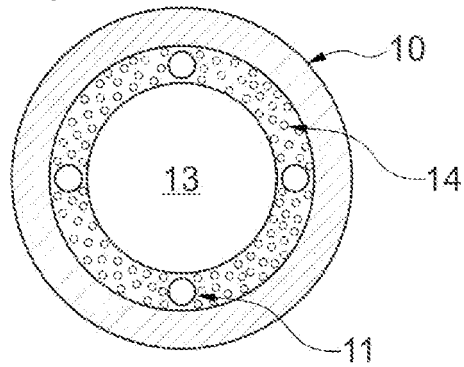


Fig. 5

(ETAT DE L'ART)

[Fig. 6]

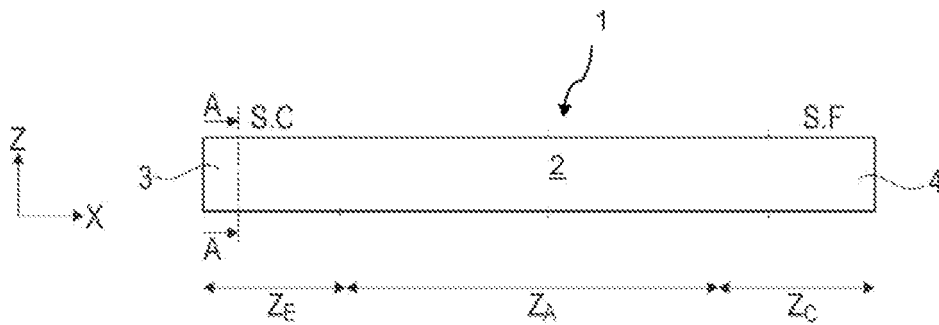


Fig.6



[Fig. 8]

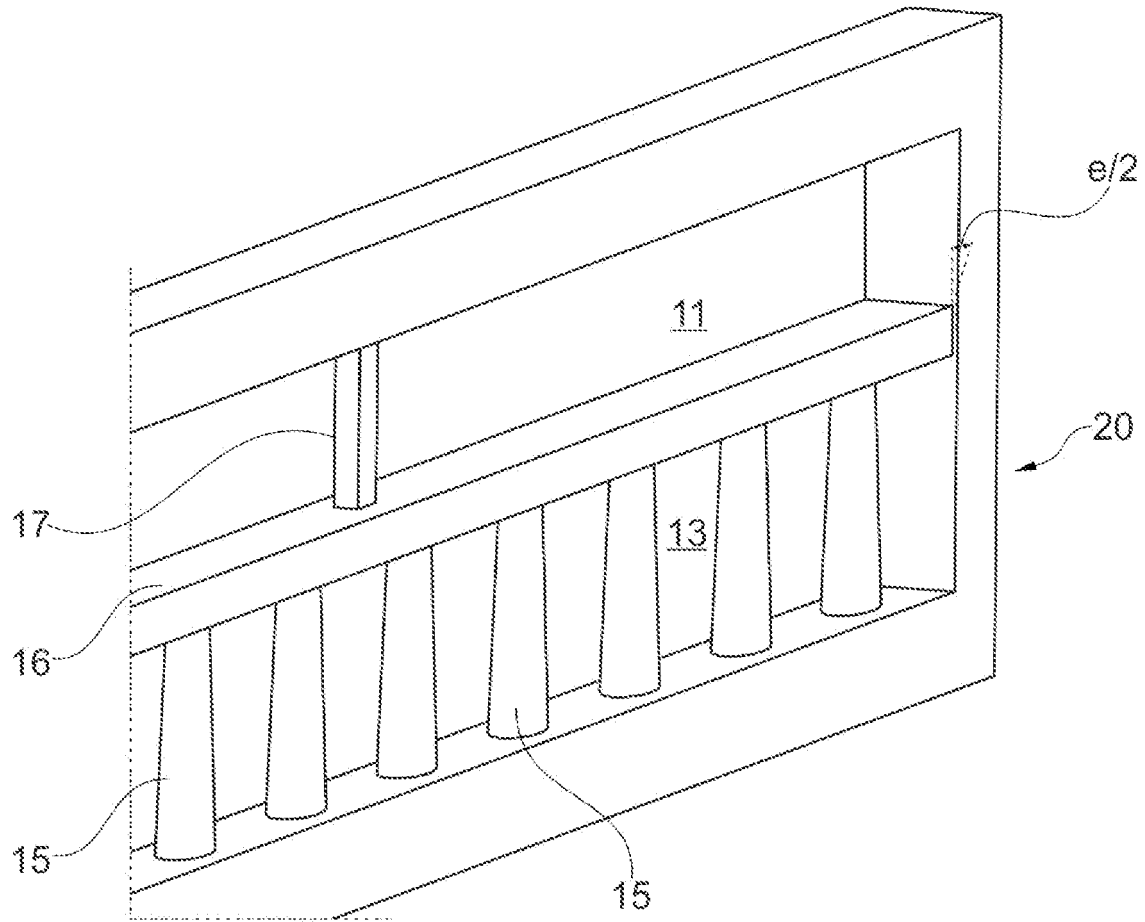


Fig. 8

[Fig. 9]

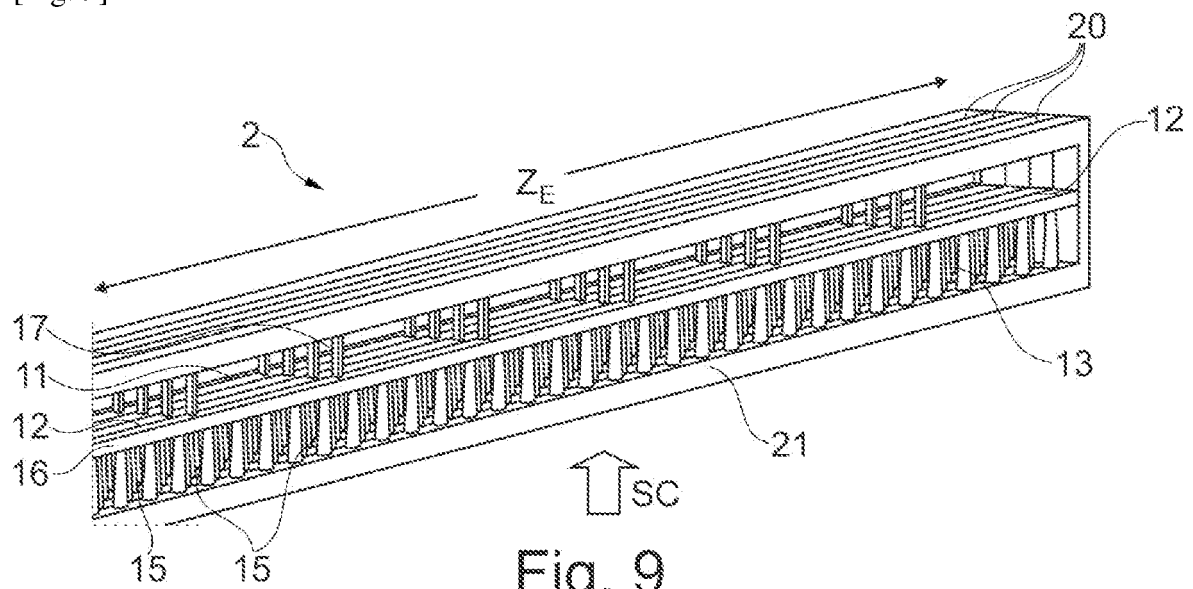


Fig. 9

[Fig. 10]

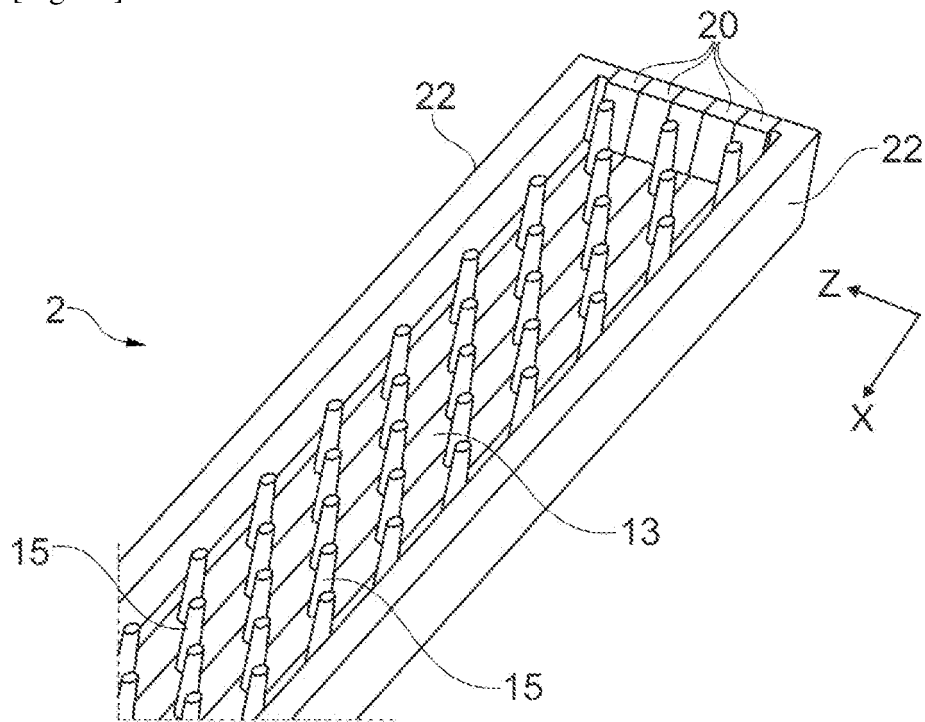


Fig. 10

[Fig. 11]

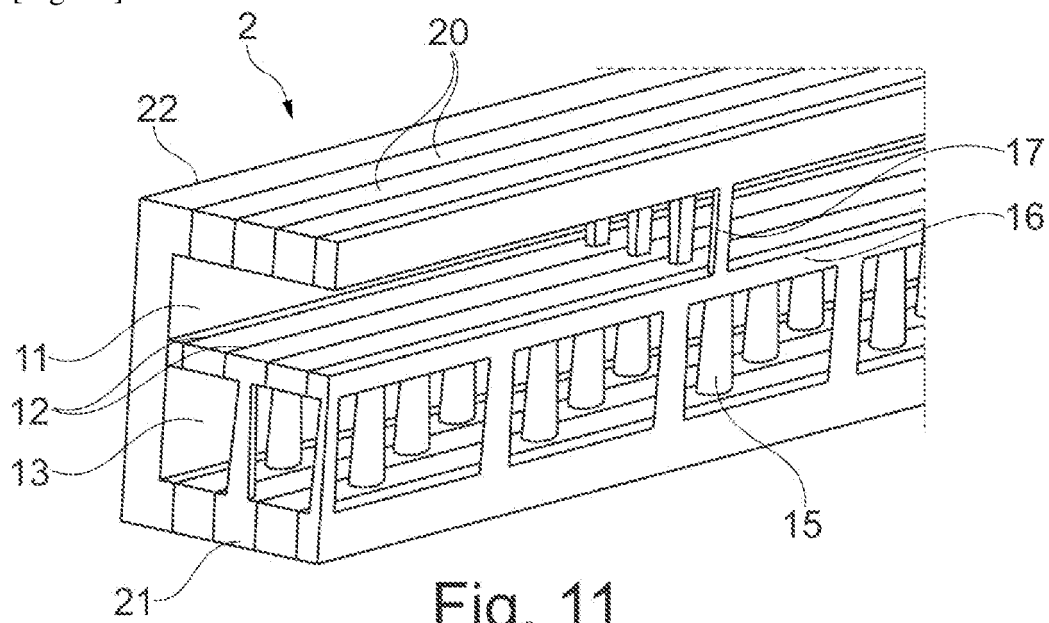


Fig. 11

[Fig. 12]

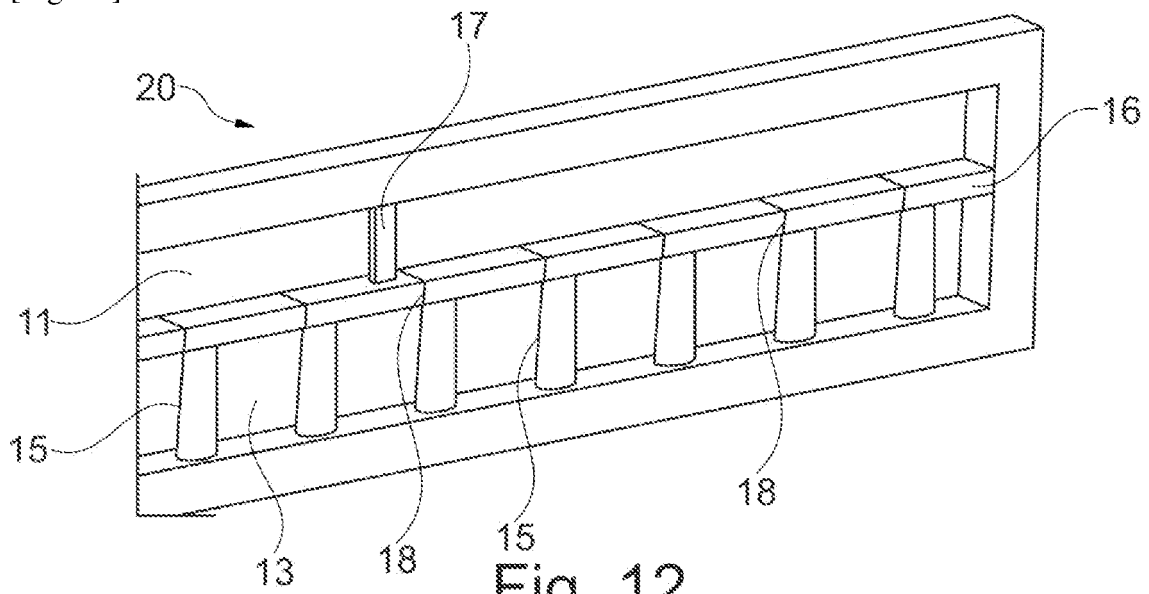


Fig. 12

[Fig. 13]

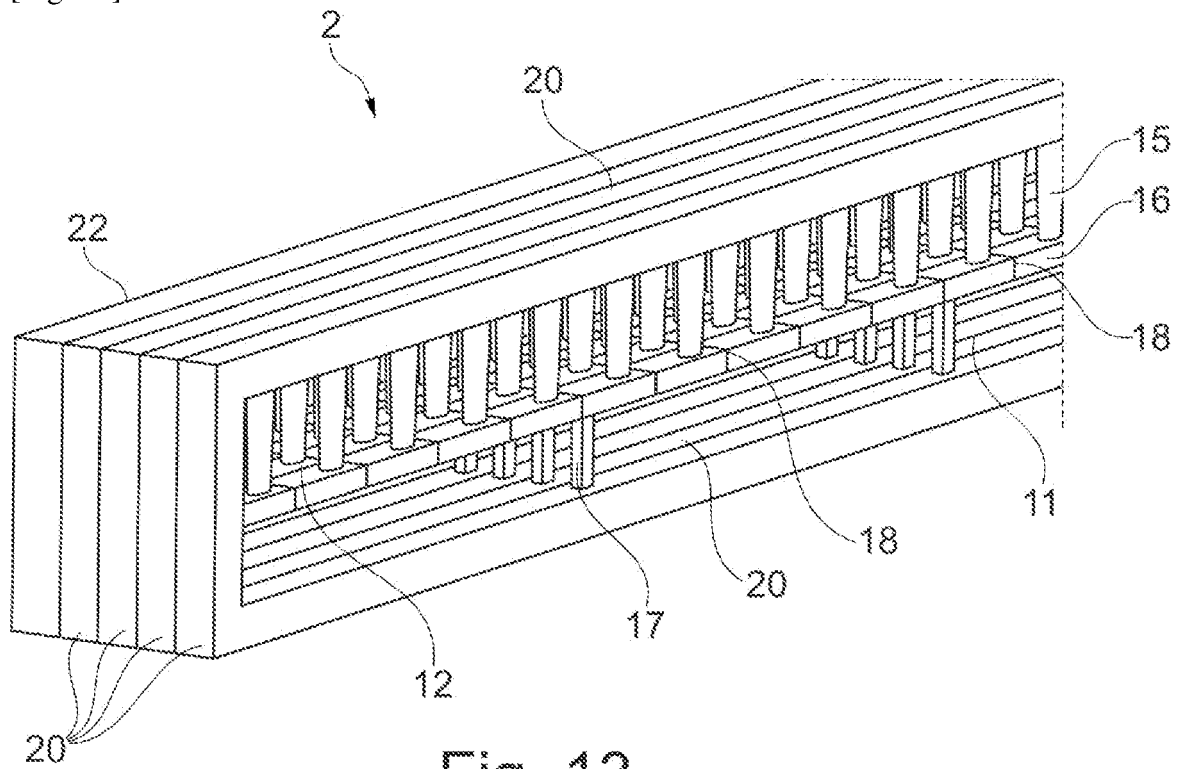


Fig. 13

[Fig. 14]

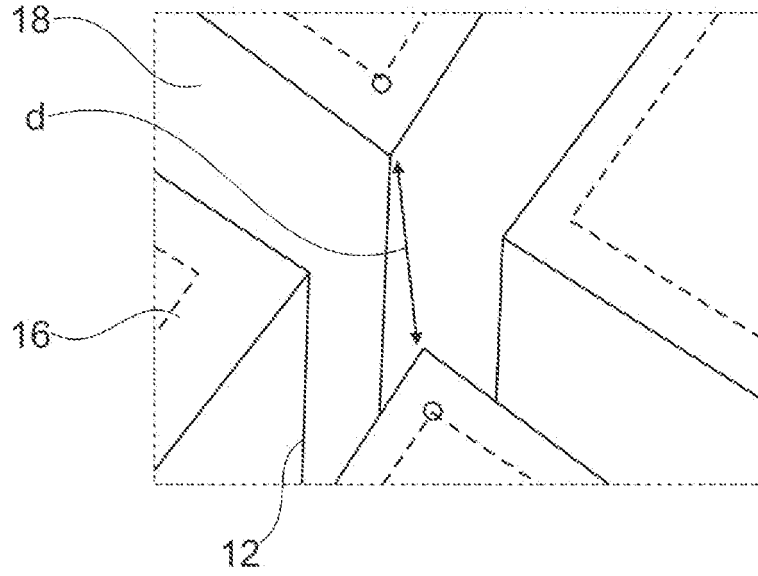


Fig. 14

[Fig. 15]

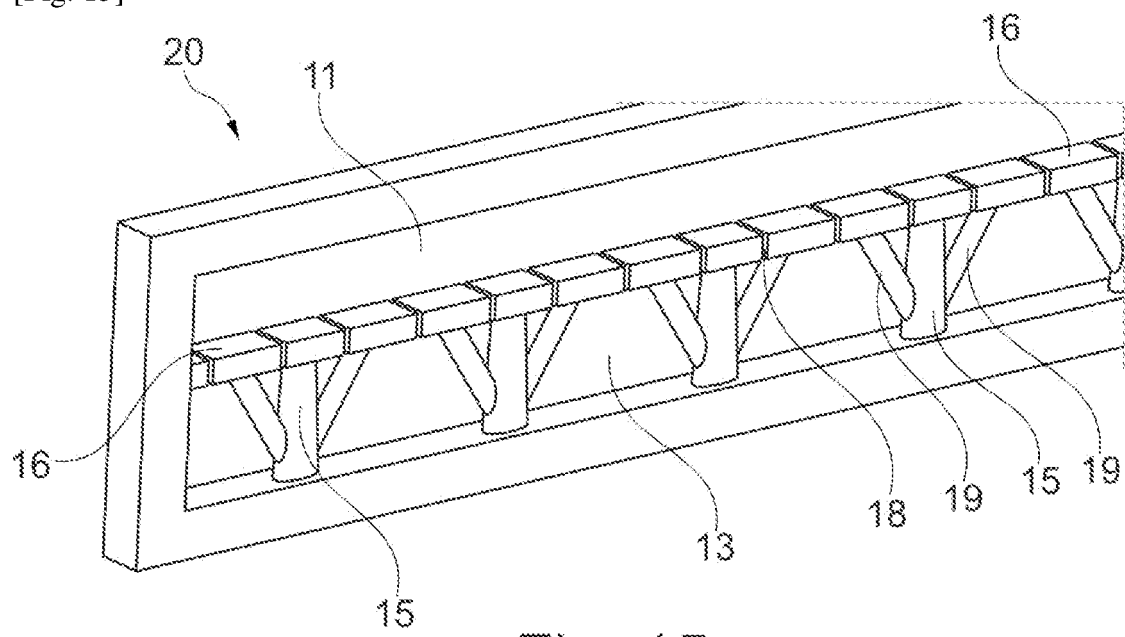
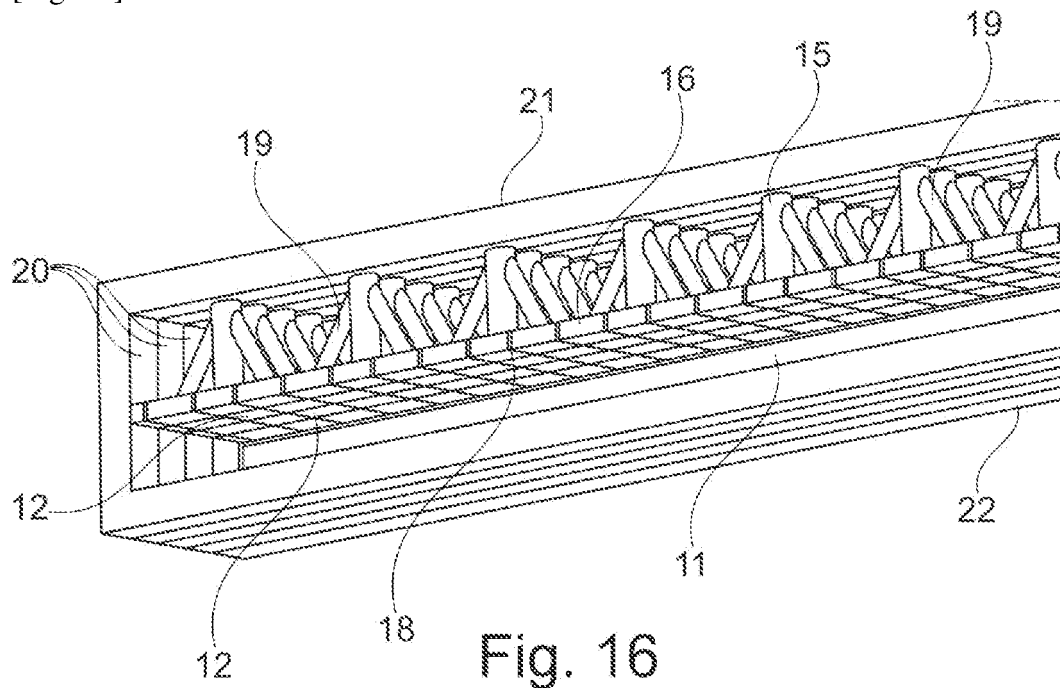
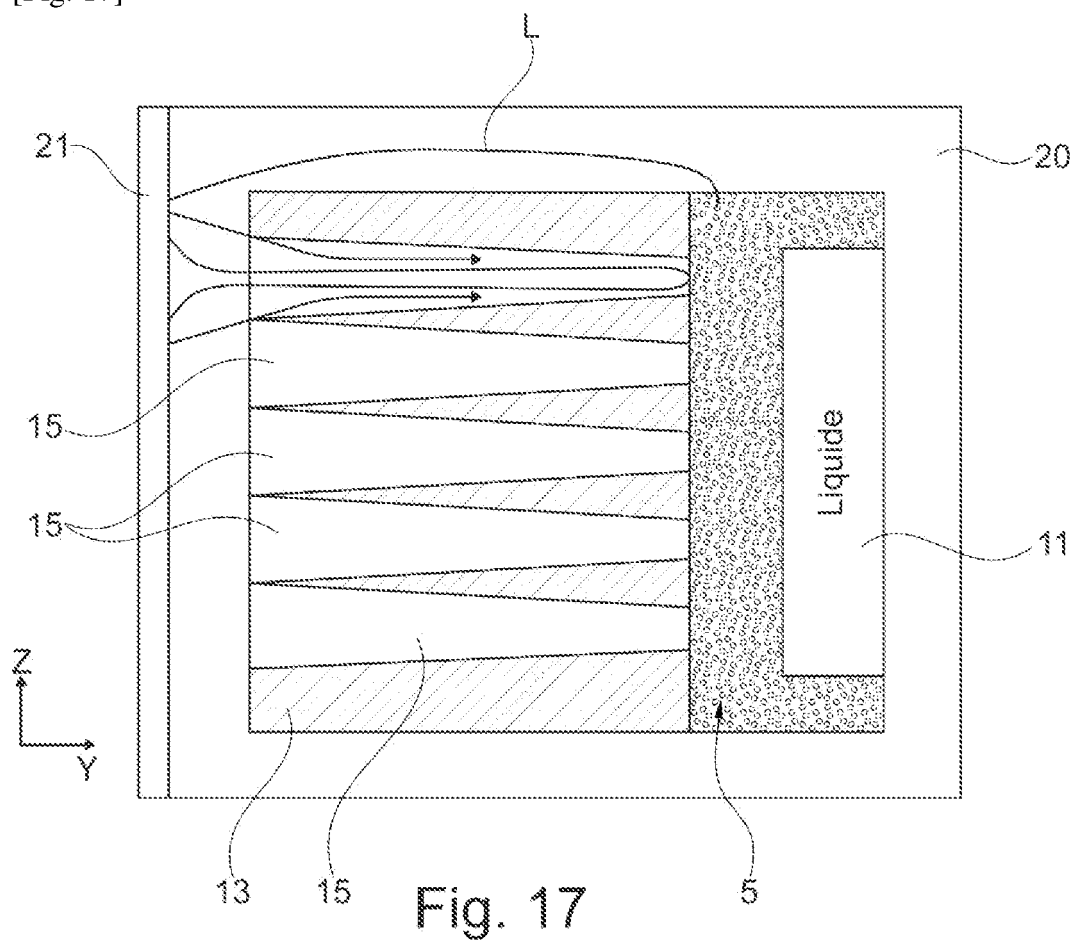


Fig. 15

[Fig. 16]



[Fig. 17]



[Fig. 18]

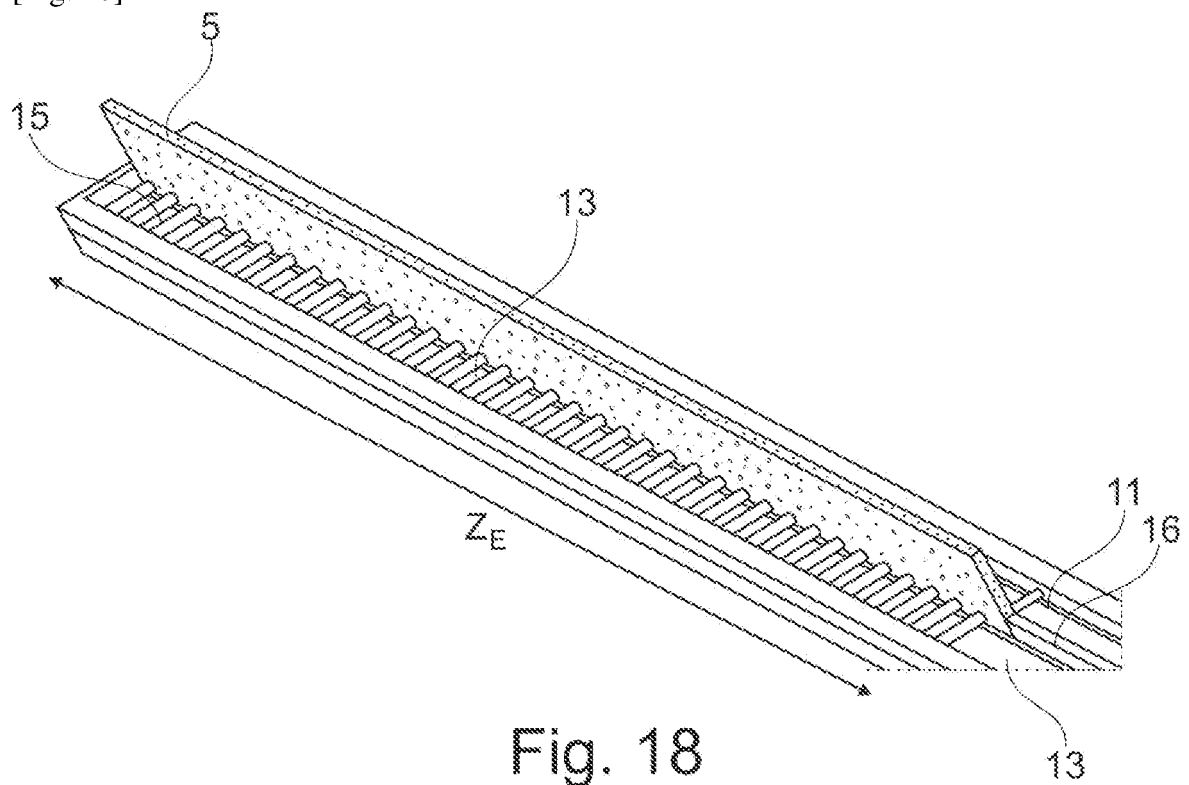


Fig. 18

[Fig. 18A]

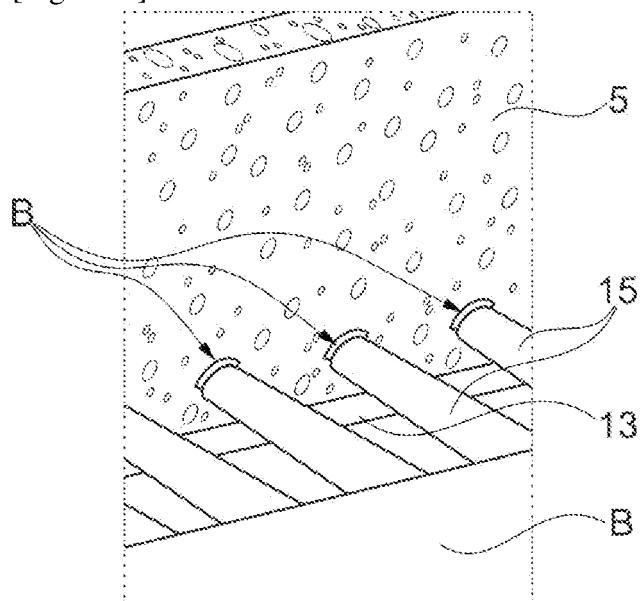


Fig. 18A

[Fig. 19A]

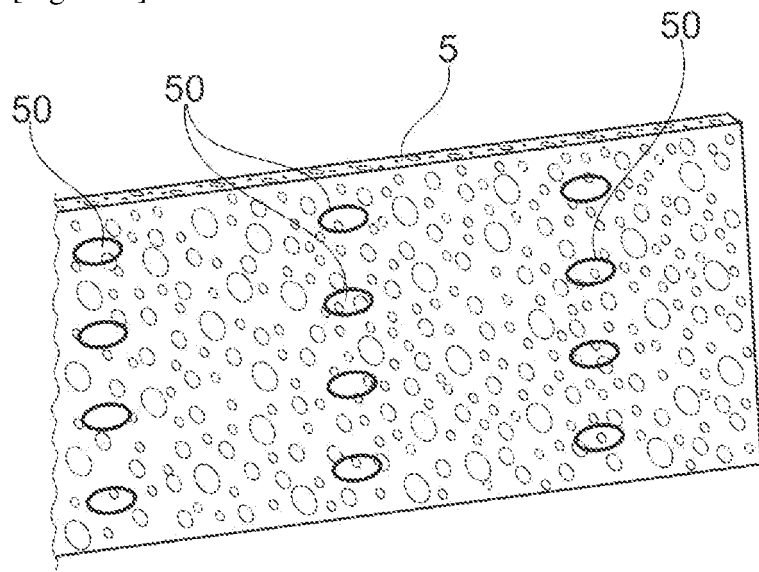


Fig. 19A

[Fig. 19B]

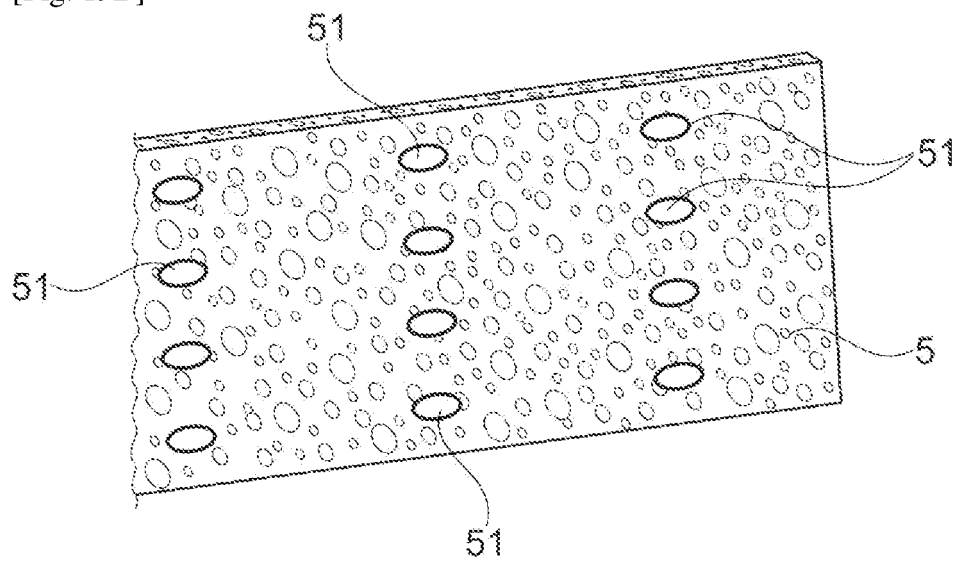


Fig. 19B

[Fig. 20]

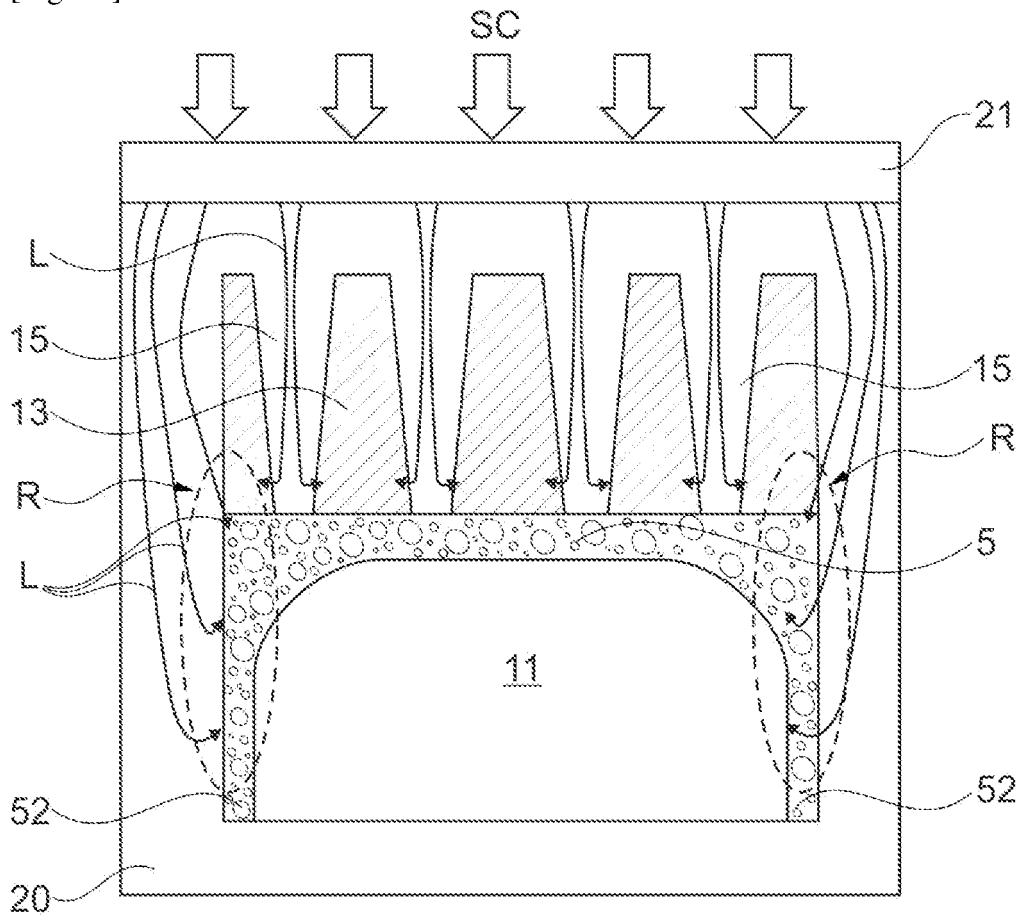


Fig. 20

[Fig. 21]

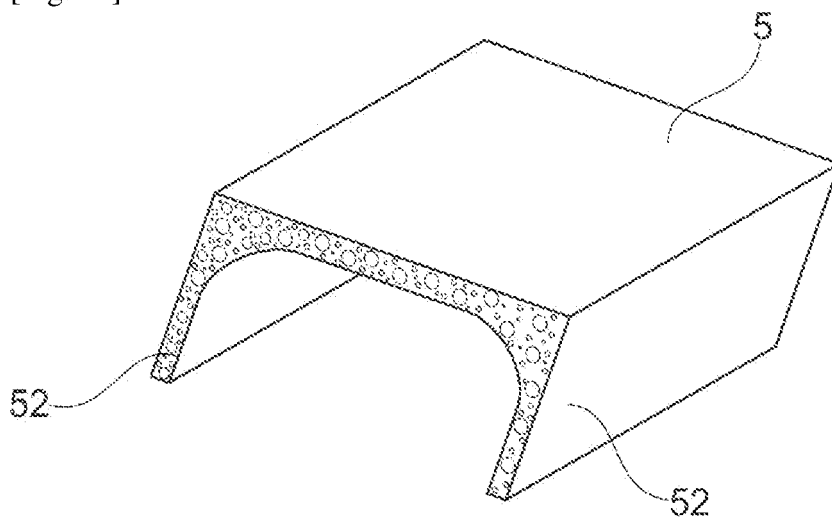
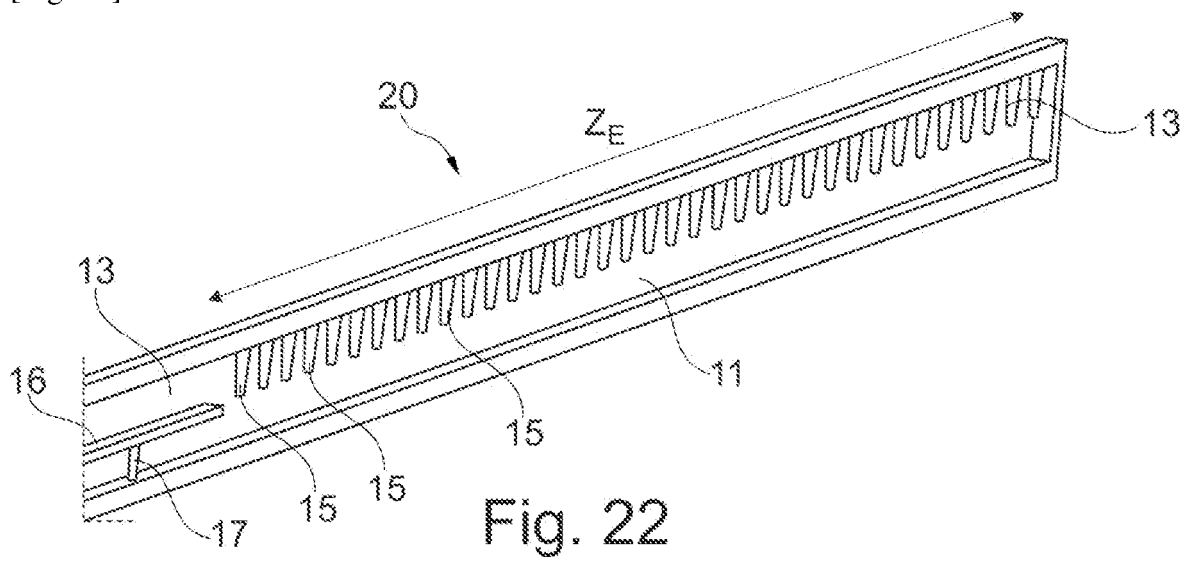
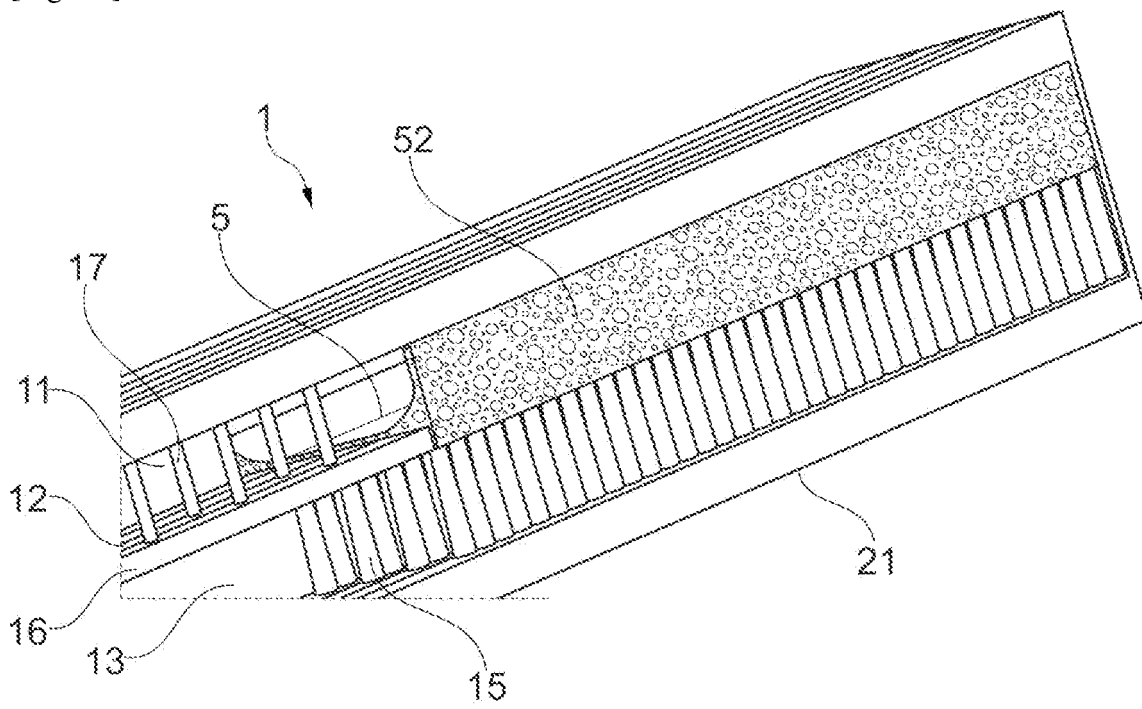


Fig. 21

[Fig. 22]



[Fig. 23]



[Fig. 24]

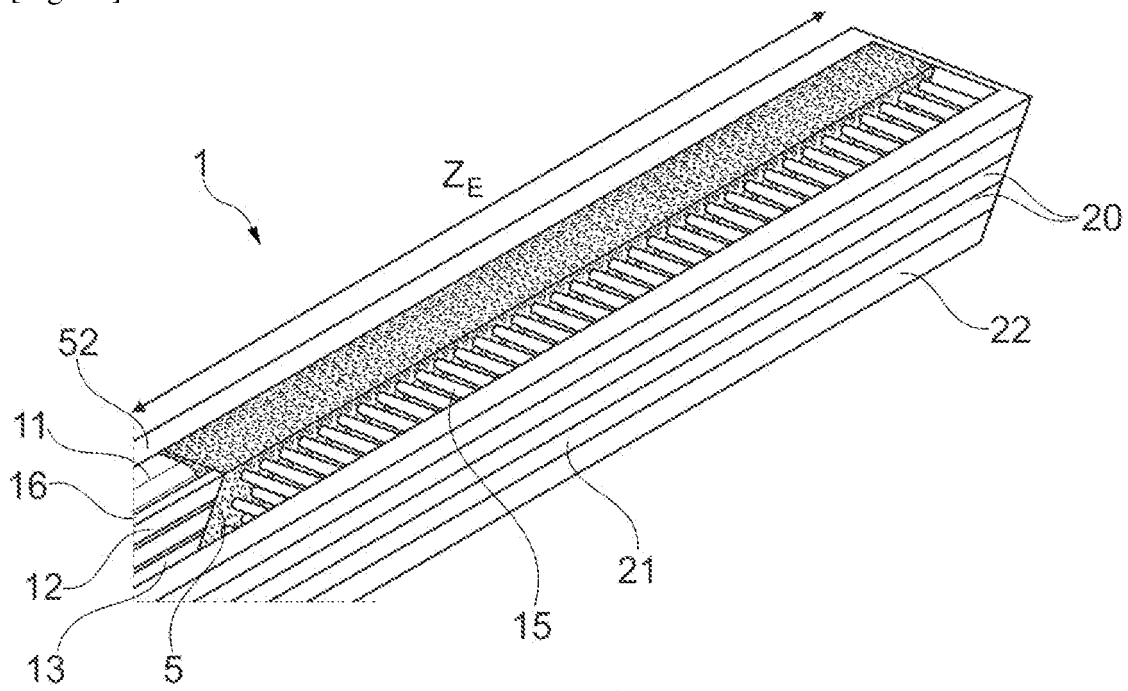


Fig. 24

[Fig. 25A]

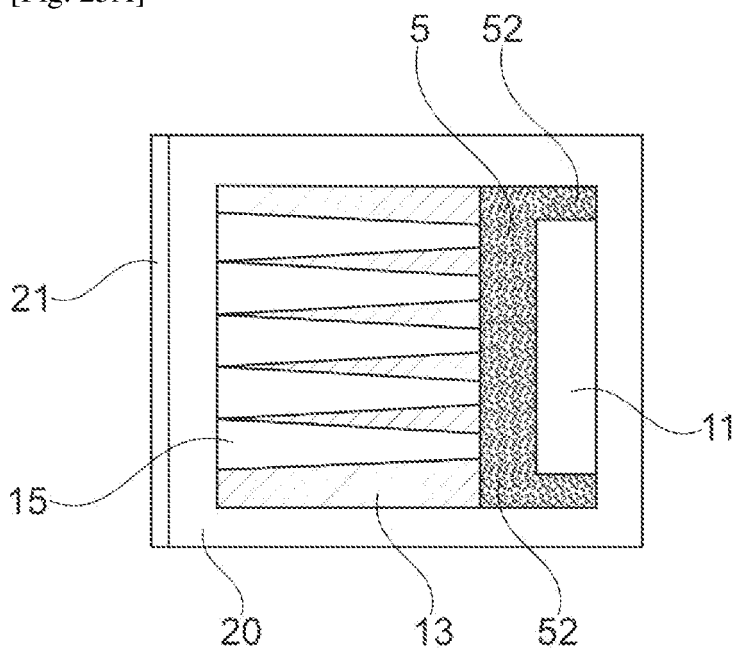


Fig. 25A

[Fig. 25B]

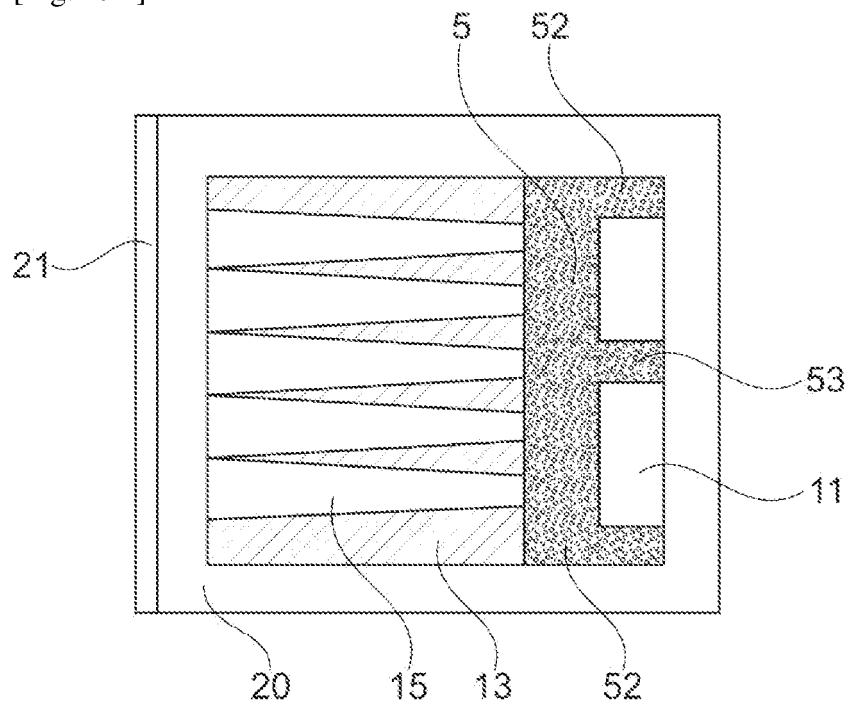


Fig. 25B

[Fig. 25C]

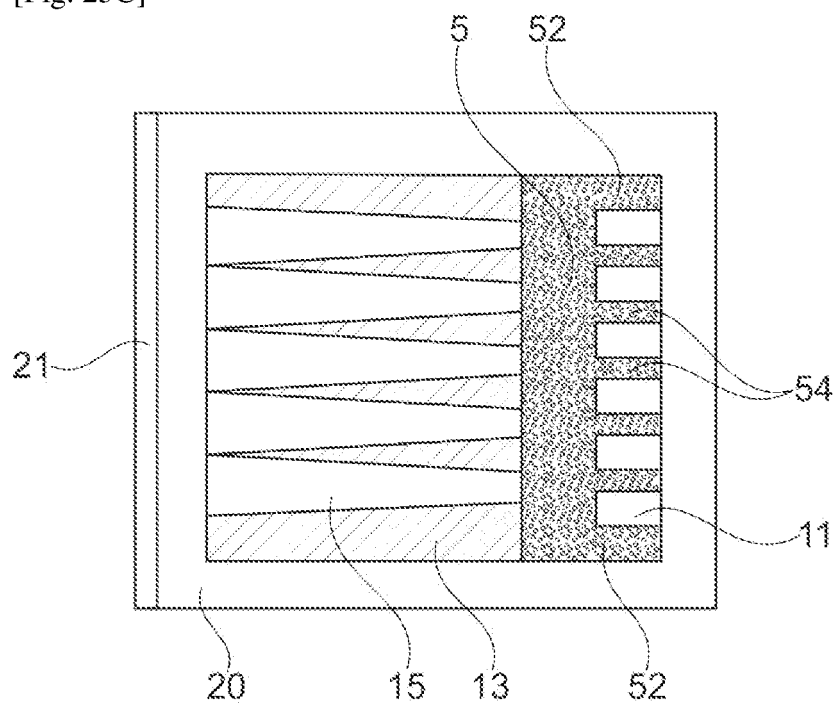
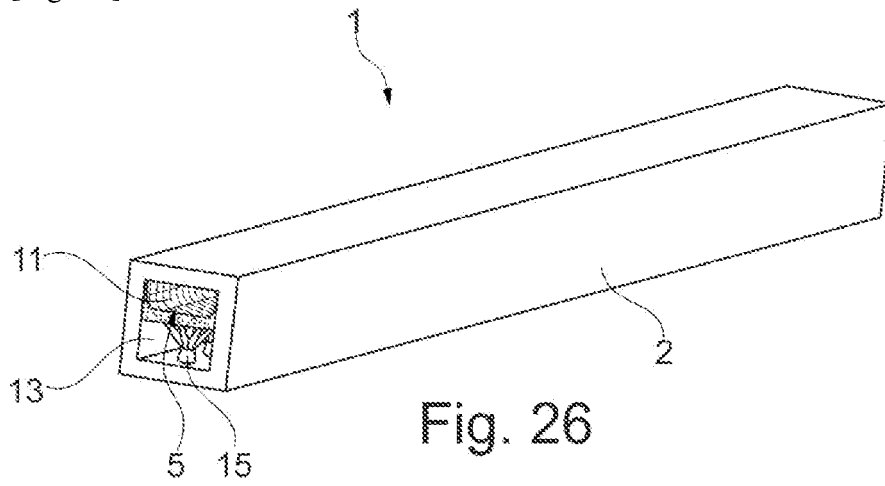
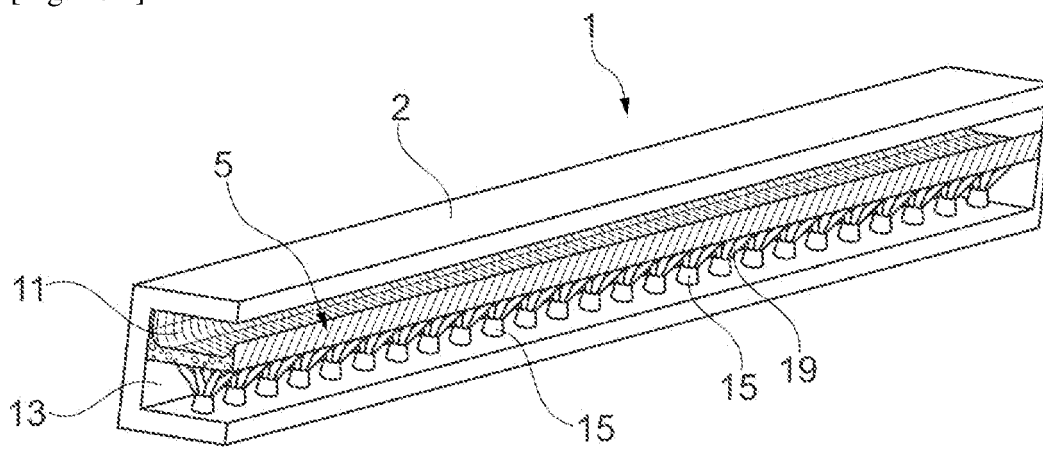


Fig. 25C

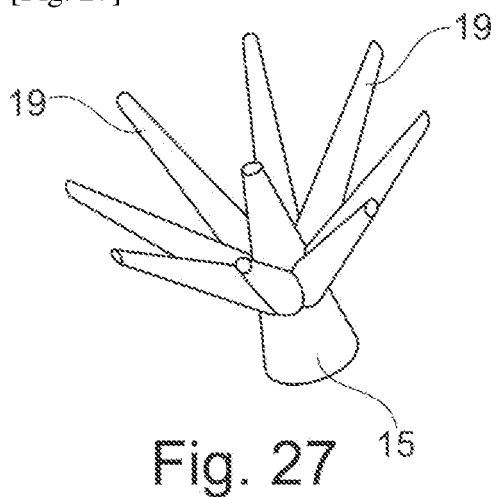
[Fig. 26]



[Fig. 26A]



[Fig. 27]



## RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

**FA 912237**  
**FR 2208350**

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                               | Revendication(s)<br>concernée(s) | Classement attribué<br>à l'invention par l'INPI |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| Catégorie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Citation du document avec indication, en cas de besoin,<br>des parties pertinentes                                                            |                                  |                                                 |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | US 2019/390919 A1 (LEWIS RYAN JOHN [US] ET AL) 26 décembre 2019 (2019-12-26)<br>* alinéas [0056] - [0060]; figures 1A, 1B, 2A, 2B *           | 1-23                             | F28D15/04                                       |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | -----<br>CN 111 879 158 A (HANGZHOU WEINER LASER TECH CO LTD) 3 novembre 2020 (2020-11-03)<br>* figures 1, 2 *                                | 1-23                             |                                                 |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | -----<br>CN 113 916 032 A (AURAS ELECTRONIC SCIENCE AND TECH INDUSTRIAL KUNSHAN CO LTD) 11 janvier 2022 (2022-01-11)<br>* figures 1A, 1B, 2 * | 1-23                             |                                                 |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | -----<br>US 2022/099383 A1 (BOZORGI PAYAM [US]) 31 mars 2022 (2022-03-31)<br>* alinéas [0067], [0070]; figures 1, 2A *                        | 1-23                             |                                                 |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | -----<br>WO 2016/118545 A1 (BOZORGI PAYAM [US]; MEINHART CARL [US]) 28 juillet 2016 (2016-07-28)<br>* alinéas [0036], [0041]; figure 1 *      | 1-23                             |                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                               |                                  | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                               |                                  | F28D<br>F28F                                    |
| Date d'achèvement de la recherche                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                               | Examineur                        |                                                 |
| 29 mars 2023                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                               | Axters, Michael                  |                                                 |
| <p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul<br/>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie<br/>A : arrière-plan technologique<br/>O : divulgation non-écrite<br/>P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention<br/>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.<br/>D : cité dans la demande<br/>L : cité pour d'autres raisons<br/>.....<br/>&amp; : membre de la même famille, document correspondant</p> |                                                                                                                                               |                                  |                                                 |

# **ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE** **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2208350 FA 912237**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.  
 Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **29-03-2023**  
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

| Document brevet cité<br>au rapport de recherche | Date de<br>publication | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s) | Date de<br>publication |
|-------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| <b>US 2019390919 A1</b>                         | <b>26-12-2019</b>      | <b>US 2019390919 A1</b>                 | <b>26-12-2019</b>      |
|                                                 |                        | <b>US 2022155025 A1</b>                 | <b>19-05-2022</b>      |
| -----                                           |                        |                                         |                        |
| <b>CN 111879158 A</b>                           | <b>03-11-2020</b>      | <b>AUCUN</b>                            |                        |
| -----                                           |                        |                                         |                        |
| <b>CN 113916032 A</b>                           | <b>11-01-2022</b>      | <b>AUCUN</b>                            |                        |
| -----                                           |                        |                                         |                        |
| <b>US 2022099383 A1</b>                         | <b>31-03-2022</b>      | <b>AUCUN</b>                            |                        |
| -----                                           |                        |                                         |                        |
| <b>WO 2016118545 A1</b>                         | <b>28-07-2016</b>      | <b>CN 107532860 A</b>                   | <b>02-01-2018</b>      |
|                                                 |                        | <b>EP 3247962 A1</b>                    | <b>29-11-2017</b>      |
|                                                 |                        | <b>JP 2018503058 A</b>                  | <b>01-02-2018</b>      |
|                                                 |                        | <b>KR 20170103900 A</b>                 | <b>13-09-2017</b>      |
|                                                 |                        | <b>US 2016216042 A1</b>                 | <b>28-07-2016</b>      |
|                                                 |                        | <b>US 2020003500 A1</b>                 | <b>02-01-2020</b>      |
|                                                 |                        | <b>WO 2016118545 A1</b>                 | <b>28-07-2016</b>      |
| -----                                           |                        |                                         |                        |