

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ EVAPORATEUR A INTERFACE DE VAPORISATION OPTIMISEE.

②② Date de dépôt : 18.04.17.

③③ Priorité :

⑥① Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *EURO HEAT PIPES Société
anonyme* — BE.

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 19.10.18 Bulletin 18/42.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 07.06.19 Bulletin 19/23.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : DUPONT VINCENT, VAN OOST
STEPHANE, DE TROZ VINCENT et MOHAUPT
MIKAEL.

⑦③ Titulaire(s) : EURO HEAT PIPES Société anonyme.

⑦④ Mandataire(s) : CABINET PLASSERAUD.

FR 3 065 279 - B1



Évaporateur à interface de vaporisation optimisée

La présente invention est relative aux évaporateurs, habituellement utilisés dans les systèmes de transfert
5 thermique à fluide de travail diphasique.

Plus précisément, on s'intéresse à l'interface de vaporisation à l'endroit duquel du liquide se transforme en vapeur en absorbant une quantité importante d'énergie calorifique.

10 Ce genre d'évaporateur est utilisé habituellement pour refroidir un équipement électronique, comme un processeur (CPU, GPU), un module de puissance (IGBT, SiC, Gan etc.), ou tout autre composant électronique dégageant des calories, ou toute autre source de chaleur.

15 Ce genre d'évaporateur est utilisé dans un système qui comprend un condenseur et des conduites aller et retour pour faire circuler le fluide entre l'évaporateur et le condenseur.

La tendance actuelle de l'électronique amène à devoir
20 évacuer des puissances thermiques importantes sur de petites surfaces.

Dans l'évaporateur, on prévoit au niveau de l'interface entre la mèche capillaire (qui amène le liquide) et l'organe ou la plaque de réception/transfert de calories
25 (en contact avec la source chaude primaire qui amène les calories) des espaces vides qui forment des canaux d'évacuation de la vapeur. Ces canaux de vapeur sont aménagés soit dans la mèche capillaire soit dans l'organe de réception des calories. Le plus courant est de prévoir
30 des rainures de section rectangulaire pour former de tels canaux vapeur, comme par exemple enseigné par le document US5725049 [NASA].

Certains ont essayé d'accroître la capacité thermique en dessinant des canaux vapeur de formes différentes pour
35 accroître la capacité en termes de flux thermique. En effet la présence des canaux vapeur entraîne une concentration de

la densité de flux de chaleur au contact de la mèche ce qui a conduit les développeurs à privilégier des rainures dites « ré-entrantes » comme par exemple dans le document EP0987509 [Matra Marconi Space].

5 D'autres ont essayé de minimiser les fuites thermiques parasites, comme par exemple dans le document US6330907 [Mitsubishi], mais la formation de bulles de vapeur dans la zone de contact avec la mèche n'est pas évitée ce qui menace un bon approvisionnement en liquide vers la zone de
10 vaporisation.

Mais on constate que les interfaces de vaporisation connues ne permettent pas de traiter un flux thermique surfacique au-delà de 20 Watts/cm² car les coefficients d'échange thermique se dégradent très fortement avec
15 l'accroissement de la densité de flux de chaleur du fait d'un enfoncement du front de vaporisation à l'intérieur de la mèche primaire.

Or, il s'avère que les besoins sont désormais plus importants c'est pourquoi les inventeurs ont cherché à
20 optimiser l'interface de vaporisation des évaporateurs dans les boucles de transfert thermique à fluide de travail diphasique.

Dans ce but, l'invention a pour objet un évaporateur à capillaire pour système de transfert thermique,
25 l'évaporateur comprenant :

- un organe de réception (1) des calories comprenant une base (10) et une pluralité de projections (11), chaque projection s'étendant à partir de la base jusqu'à un sommet (12), et dont la taille décroît avec l'éloignement par
30 rapport à la base, chaque projection ayant des flancs latéraux (13),
- une mèche primaire (2) en premier matériau poreux et présentant une face frontale (20) adjacente au sommet des projections, les flancs latéraux des projections délimitant
35 avec la mèche primaire des espaces vides formant des canaux

de vapeur (4), caractérisé en ce que les flancs latéraux des projections sont revêtus d'une couche fine (3) de matériau poreux, de préférence d'un second matériau différent du premier matériau.

5 Par le vocable « *couche fine* », on entend une couche d'épaisseur inférieure à 1 mm. Les inventeurs ont constaté qu'avantageusement une épaisseur faible associée aux projections concourait à l'obtention d'une bonne performance.

10 Avantageusement, le fluide en phase liquide est pompé par capillarité depuis la mèche primaire jusqu'à la couche fine qui revêt les projections à l'endroit duquel la vaporisation a lieu ; la surface d'échange est augmentée. Grâce à ces dispositions, on obtient une interface
15 d'évaporation capable de traiter un flux thermique supérieur à 50 Watts/cm², avec des coefficients d'échanges thermiques W/(m²K) bien supérieurs à ceux de l'art connu et, en fonction des différentes configurations possibles l'interface d'évaporation sera même capable de traiter
20 plusieurs dizaines, voire centaines, de Watts/cm².

Aussi, on remarque que dans la zone du sommet des projections, le flux thermique transféré directement à la mèche primaire est fortement réduit vis-à-vis du flux thermique total (on vaporise principalement sur les flancs)
25 et par conséquent on évite de créer un phénomène d'ébullition dans la zone de contact avec la mèche, autrement dit on évite la surchauffe de la mèche primaire. Ainsi on limite le transfert de flux parasite à la fois en limitant très fortement la pénétration du front de
30 vaporisation dans la mèche primaire et aussi en limitant la surchauffe de l'organe de réception tout en favorisant l'extraction de la vapeur créée dans les canaux dédiés.

Dans divers modes de réalisation de l'invention, on peut éventuellement avoir recours en outre à l'une et/ou à
35 l'autre des dispositions suivantes :

Selon une option, la couche fine peut présenter une épaisseur substantiellement uniforme. Selon cette configuration, on peut prévoir un procédé de fabrication et d'assemblage relativement simple en utilisant une trame
5 tissée métallique qui soit intimement liée à la surface de l'organe de réception.

Selon une option, la couche fine peut présenter une épaisseur non uniforme, la partie la plus épaisse (31) de la couche fine étant disposée au contact de la mèche
10 primaire au voisinage du sommet de chaque projection, et l'épaisseur (EC) de ladite couche fine diminuant en s'éloignant de la mèche primaire. Cette configuration permet d'obtenir une performance globale meilleure en termes de puissance dissipée par unité de surface.

15 Selon une option, l'organe de réception des calories peut comporter une plaque, ce qui correspond à une configuration plane pour la source de chaleur à refroidir.

Selon une autre option, l'organe de réception des calories peut être formé généralement comme un cylindre, ce qui peut
20 correspondre à une configuration cylindrique pour la source de chaleur à refroidir, qui se trouve être aussi courante que la configuration à plat. Cette configuration cylindrique est courante lors de l'emploi d'un fluide à haute pression, comme l'ammoniac pour les applications
25 spatiales ; dans ce cas on peut avoir une semelle plane, généralement en aluminium, assemblée sur la surface externe de l'évaporateur cylindrique.

Selon une option, les projections peuvent être avantageusement formées sous forme de nervures rectilignes
30 de section trapézoïdale (voire triangulaire); l'organe de réception des calories est ainsi facile à fabriquer par extrusion ou usinage simple (fraisage). Par ailleurs, une telle section trapézoïdale permet une transmission robuste des efforts mécaniques, en particulier induits par
35 l'assemblage en compression des modules de puissance sur

l'évaporateur par vissage (ce que ne permettent pas les ailettes conventionnelles fines qui présentent une épaisseur sensiblement constante sur leur hauteur, en particulier avec le cuivre).

5 Selon une option, les projections sont adjacentes les unes aux autres et chaque canal de vapeur (4) présente une section généralement triangulaire avec une de ses pointes dirigée vers la base de l'organe de réception. La densité des zones recouvertes par la couche fine est ainsi
10 maximisée et par conséquent les échanges thermiques aussi, pour une surface globale disponible donnée.

Selon une option, la section des projections forme un trapèze isocèle symétrique (autrement dit une « dent »), avec le petit côté ayant une longueur au plus de 20 % par
15 rapport à la longueur du grand côté. Autrement dit $D3 < 0,2 W$; ainsi sont formés des canaux vapeur de dimension suffisante notamment leur largeur entre les sommets des projections permet un écoulement rapide de la vapeur sans pertes de charge excessives.

20 Selon une option, le petit côté $D3$ (c'est-à-dire la largeur du sommet) a une dimension $< 0,3$ mm. Les inventeurs ont remarqué que, contrairement aux préjugés de l'homme de l'art, la finesse des sommets n'est pas problématique et est même un avantage si celle-ci est conjuguée avec la
25 présence de la couche fine car elle évite l'apparition de la phase vapeur dans la zone d'approvisionnement en liquide et limite le transfert de flux parasite à travers la mèche primaire.

Selon une option, s'agissant de la géométrie de la section
30 de la projection, le demi-angle d'ouverture au sommet α est inférieur à 45° , et de préférence compris entre 5° et 30° . Ceci correspond au fait que la hauteur des projections $H2$ est supérieure à $1/2$ de leur emprise W sur la base ce qui explique en partie l'augmentation d'efficacité des échanges
35 par une augmentation de la surface efficace.

Selon une option, la mèche primaire est obtenue préférentiellement à partir d'un matériau mauvais conducteur thermique, comme le nickel, l'inox, la céramique ou le téflon ; avec typiquement une conductivité thermique inférieure à 100 W/mK. On évite ainsi de réchauffer le liquide situé de l'autre côté de la mèche primaire et on limite fortement les fuites thermiques parasites.

Selon une option, la couche fine est obtenue à partir d'un bon conducteur thermique, comme le cuivre ou l'aluminium; avec typiquement un coefficient supérieur à 100 W/mK et de préférence supérieur à 380 W/mK.

On favorise ainsi une bonne diffusion de la chaleur dans la couche fine et une bonne répartition des endroits de vaporisation.

Selon une option, le diamètre des pores de la couche fine est inférieur au diamètre des pores de la mèche primaire. On favorise ainsi l'approvisionnement de liquide de la couche fine depuis la mèche primaire et à l'intérieur de la couche fine à partir de la partie la plus épaisse de ladite couche fine.

Selon une option, l'épaisseur **EC** de la couche fine est inférieure à 0,5 mm, de préférence partout où la couche fine est en contact avec la plaque de réception des calories 1. Les inventeurs ont constaté qu'avantageusement une épaisseur aussi faible suffisait à obtenir une bonne performance. Par ailleurs, on remarque que la plaque de réception des calories n'est pas plate (présence des projections 11) contrairement à certaines réalisations de l'art antérieur.

Selon une option, l'épaisseur **H1** de la base est comprise entre 0.5 et 5 mm. On ajuste cette épaisseur pour obtenir une rigidité et une solidité suffisantes en vue de l'assemblage, par exemple par vissage, du composant à refroidir.

Selon une option, la hauteur **H2** des projections est

comprise entre 0.5 et 3 mm. On ajuste cette hauteur pour obtenir une section de passage suffisante pour les canaux vapeur pour éviter des problèmes potentiels de pertes de charges.

5 Selon une option, les projections sont formées sous forme de nervures circulaires. Ceci peut être utilisé dans le cas où l'évaporateur se présente sous une forme de disque. Selon une option, les projections sont formées sous forme de plot conique ou de plot pyramidal. L'efficacité
10 surfacique peut être encore améliorée et suivant les méthodes de fabrication retenues, le prix de revient de la plaque de réception des calories revêtue peut rester raisonnable.

Selon une option, l'épaisseur **E2** de la mèche primaire est
15 constante et de préférence comprise entre 1 et 8 mm. Une telle mèche primaire simple est un matériel disponible et peu coûteux.

Selon une option, le sommet des projections est au contact de la mèche primaire sur une surface inférieure à 20 % de
20 la surface utile de la mèche primaire.

Par ailleurs, l'invention vise également un système de transfert thermique comprenant un évaporateur tel que décrit ci-dessus, un condenseur, des conduites fluides avec soit un pompage par gravité à savoir une configuration
25 thermosiphon (incluant les configurations dites « pool boiling ») soit un pompage uniquement capillaire ou en combinaison avec un jet, soit encore un évaporateur alimenté par une pompe mécanique.

D'autres aspects, buts et avantages de l'invention
30 apparaîtront à la lecture de la description suivante d'un mode de réalisation de l'invention, donné à titre d'exemple non limitatif. L'invention sera également mieux comprise en regard des dessins joints sur lesquels :

- la figure 1 est une vue générale schématique d'un
35 système de transfert thermique incluant un évaporateur

selon l'invention,

- la figure 2 est une vue en coupe transversale partielle d'un évaporateur selon un premier mode de réalisation, selon un plan de coupe II-II visible à la figure 1,

- la figure 3 représente une vue schématique partielle en perspective de l'évaporateur,

- la figure 4 représente plus en détail une portion de la coupe transversale illustrant une projection et son revêtement poreux,

- la figure 5 représente un second mode de réalisation de type évaporateur cylindrique (au lieu de plan),

- la figure 6 représente la répartition du flux de vaporisation le long du flanc des projections revêtues de la couche fine de matériau poreux,

- la figure 7 représente le flux de chaleur à l'intérieur de la projection ainsi que le flux d'approvisionnement de liquide le long de la couche fine,

- la figure 8 illustre l'agencement des canaux vapeur dans une coupe horizontale selon un plan de coupe VIII-VIII visible à la figure 2,

- la figure 9 est une vue en coupe horizontale schématique d'un évaporateur à plots qui représente une autre variante de réalisation.

- la figure 10 illustre deux variantes de réalisation concernant la configuration de la couche fine de matériau poreux.

Sur les différentes figures, les mêmes références désignent des éléments identiques ou similaires. Pour des raisons de clarté de l'exposé, certaines dimensions ne sont pas représentées à l'échelle.

La figure 1 montre un système de transfert thermique comprenant un évaporateur **7** comprenant organe de réception **1** qui permet d'évacuer un flux de calories **Q_{in}** reçues par l'évaporateur **7** depuis un composant dissipatif ('source

chaude') en direction d'un condenseur **COND** pouvant recevoir ces calories et les évacuer **Qout** vers une 'source froide' (air ambiant, eau tiède ou froide, panneau radiatif, etc. ...).

5 Une conduite vapeur **8** permet d'acheminer la vapeur produite dans l'évaporateur vers le condenseur. Une conduite liquide **9** permet de ramener le liquide condensé dans le condenseur vers l'évaporateur **7**. Le condenseur et les conduites sont supposées connus en soi et ne seront pas
10 décrites ici plus en détail. L'évaporateur, le condenseur et les conduites forment une boucle de transfert thermique, qui fonctionne soit en utilisant la gravité (thermosiphon) soit en utilisant un pompage par capillarité, solution qui fonctionne à la fois sur terre et en configuration
15 d'apesanteur ou contre un champ d'accélération (gravité, mouvement d'un véhicule) soit encore un pompage assisté par une pompe mécanique.

Dans l'exemple illustré à la figure 1, il est représenté un réservoir **RES** qui sert de vase d'expansion au
20 liquide (dilatation thermique du liquide et variation du volume de vapeur en dehors du réservoir); dans le cas où ce réservoir est présent comme élément séparé on parle d'une boucle dite 'CPL' (Capillary Pumped Loop). Selon une autre configuration, la fonction réservoir est prévue à
25 l'intérieur de l'évaporateur et dans ce cas on parle d'une boucle dite 'LHP' (Loop Heat Pipe'). Dans le cas d'une configuration « thermosiphon » la présence du réservoir n'est pas nécessaire.

Le fonctionnement de la boucle en général, avec
30 notamment la conduite vapeur, la conduite liquide et le condenseur est connu en soi, il ne sera pas détaillé dans la suite. Dans la suite, la description sera centrée sur l'évaporateur et sa structure interne.

L'évaporateur **7** comprend un organe de réception des
35 calories repéré **1**; dans le premier exemple illustré, il

s'agit d'une plaque **1** à laquelle est adossée un élément à refroidir (non représenté) qui apporte un flux de calories repérée **Q_{in}**. Cette plaque est munie d'une structure particulière du côté intérieur à l'évaporateur, ceci sera
5 détaillé plus loin.

L'évaporateur **7** en question est un évaporateur de type capillaire, c'est-à-dire qu'il contient une mèche, autrement dit une masse poreuse, qui aspire par capillarité du liquide qui se trouve dans un compartiment liquide **5** en
10 communication avec la conduite liquide **9** et le réservoir d'expansion **RES**.

Il faut noter que, si on se place d'un point de vue plus large que celui de l'évaporateur, le terme « *organe de transfert* » **1** pourrait être utilisé à la place du terme
15 « organe de réception ». Dans la suite, le terme « organe de réception » pourra aussi être remplacé dans certains cas par le terme « plaque chaude » ou « plaque de réception ».

Structurellement, l'évaporateur **7** comprend la plaque chaude **1** susmentionnée, une structure capillaire qui sera
20 détaillée plus loin, le compartiment liquide **5** susmentionné et un carter-couvercle qui permet d'assembler le tout et de délimiter un espace intérieur étanche de l'évaporateur qui contient hermétiquement le fluide de travail.

Plus précisément, la structure capillaire comprend une
25 mèche primaire repérée **2** complétée par une structure de revêtement capillaire qui forme une couche mince de matériau poreux (repère **3**) dont il sera question plus en détails ci-après.

Selon un premier mode de réalisation illustré en
30 particulier aux figures 2 à 4, la plaque chaude, autrement dit l'organe de réception **1** des calories, comprend une base **10** qui s'étend selon un plan **YZ** selon 2 directions **Y, Z** perpendiculaires à l'axe de profondeur noté **X**, et une pluralité de projections **11**, chacune s'étendant à partir de
35 la base **10** jusqu'à un sommet **12**, avec des flancs latéraux

repérés **13**.

Avantageusement, la taille (la dimension) de chacune desdites projections **11** décroît avec l'éloignement par rapport à la base.

5 Plus précisément, si on considère la section de la projection dans le plan XY (Figs 2 et 4), celle-ci présente une forme trapézoïdale avec une base large de dimension notée **W** et un sommet étroit de dimension notée **D3**. La base et le sommet sont parallèles, ici parallèles à l'axe **Y**, et
 10 les flancs latéraux **13** de la projection s'étendent en oblique avec un angle β par rapport à la base.

En regardant la section, on peut aussi appeler cette projection **11** une « dent ».

Dans l'exemple illustré, il y a une symétrie de la
 15 forme trapézoïdale, plus précisément avec une forme de trapèze isocèle symétrique, avec $D3 < 0,2 W$.

On peut aussi qualifier cette forme de tronconique avec un demi-angle d'ouverture au sommet noté α . On choisit de préférence $\alpha < 45^\circ$, ou dit autrement $\beta > 45^\circ$.

20 De préférence, on pourra choisir pour demi-angle d'ouverture au sommet α compris entre 5° et 30° .

Selon un exemple de réalisation particulier, le petit côté **D3** aura une taille $< 0,3$ mm.

Comme visible à la figure 3, les projections s'étendent
 25 à section constante le long de la direction **Z**. Ainsi, entre lesdites projections, sont formés des espaces vides, formés comme des rainures **4** et aussi appelés dans le présent contexte « canaux de vaporisation » **4** ou « canaux vapeur ».

Avantageusement, on prévoit que les projections **11**
 30 soient adjacentes les unes aux autres, chaque projections voisines étant séparées par un canal vapeur **4** ; on remarque donc un motif à répétition le long de l'axe **Y** avec un pas (*pitch en anglais*) correspondant à la dimension **W** qui n'est autre que la largeur de la projection **11** à sa base.

35 La hauteur des canaux de vaporisation est repérée **H2**.

Dans cet exemple, les projections sont formées sous forme de nervures rectilignes de section trapézoïdale et **W** représente le pas/pitch de répétition pris le long de l'axe **Y**.

5 La mèche primaire, repérée **2**, est formée comme une couche épaisse de matériau poreux ; dans l'exemple illustré, l'épaisseur **E2** de cette couche est constante sur toute la surface de l'évaporateur ce qui permet d'utiliser un produit standard bon marché. On peut choisir typiquement
10 pour l'épaisseur **E2** de cette mèche primaire une valeur comprise entre 1 et 8 mm, de préférence comprise entre 2 mm et 5 mm.

 La mèche primaire **2** présente une face frontale **20** faisant face à la plaque de réception **1**, et une face
15 arrière **25** au contact du liquide **5**. Optionnellement, la mèche primaire plane peut être complétée par des parois internes **28** ce qui forme une structure rigide permettant de renforcer la tenue mécanique de l'évaporateur. Ces parois internes peuvent être poreuses ou non-poreuses suivant les
20 besoins éventuels de fonctions de distribution de liquide par capillarité.

 Il n'est pas exclu d'avoir une mèche primaire d'épaisseur non constante, comme il sera vu plus loin.

 Pour cette mèche primaire **2**, on choisit de préférence
25 un matériau plutôt mauvais conducteur thermique comme le nickel, l'innox ou le téflon. D'une manière générale on choisira de préférence un matériau ayant une conductivité thermique inférieure à 70 W/mK, de préférence inférieure à 20 W/mK.

30 Avantageusement selon l'invention, les flancs **13** des projections sont revêtus d'une couche fine **3** de matériau poreux.

 Par couche fine, il faut comprendre généralement une couche d'épaisseur inférieure à 1 mm.

35 On désigne par plan d'interface **P** un plan parallèle à

YZ adjacent au sommet **12** des projections, et qui dans l'état assemblé de l'évaporateur, coïncide aussi avec la face frontale **20** de la mèche primaire.

On note que les flancs **13** des projections munis de leur revêtement délimitent avec la face frontale **20** de la mèche primaire la section de passage des canaux de vapeur **4**.

Pour en revenir à la couche fine **3** de matériau poreux, selon le premier exemple de réalisation, notamment illustré à la figure 4, son épaisseur n'est pas constante sur les flancs **13** des projections et varie de préférence le long des flancs en s'éloignant de la mèche primaire ; la partie la plus épaisse **31** est disposée au contact de la mèche primaire, au niveau d'une interface **23** placée dans le plan **P** au voisinage du sommet de chaque projection **12**, et l'épaisseur **EC** de ladite couche fine diminue en s'éloignant de la mèche primaire, jusqu'au voisinage du fond **41** de la rainure où la portion d'extrémité de la couche fine repérée **32** présente une épaisseur quasiment nulle.

Avantageusement, l'épaisseur **EC** de la couche fine est partout inférieure à 0,5 mm.

Selon une autre possibilité, on peut choisir pour limite supérieure d'épaisseur **EC** une valeur inférieure à $0,2 \times W$.

Dans une configuration théorique préférée, en partant de l'interface **23** au contact de la mèche primaire **2**, on définit un axe **L** le long du flanc **13** de la projection, l'épaisseur **EC** vaut **EC1** à l'abscisse **L1** et diminue lorsque on se déplace selon **L** vers le fond **41** de la rainure, où l'épaisseur **EC3** est quasi nulle ou à tout le moins notablement plus fine que la partie **EC1**, en passant par des épaisseurs intermédiaires **EC2**.

À noter que sur les différentes figures, le fond de la rainure **41** est considéré comme « ponctuel ». En réalité, du fait des contraintes d'usinage et/ou pour faciliter la création de la couche fine **3**, il peut exister une zone non

couverte par la couche fine **3** dont la dimension est comparable à **D3**.

La couche fine 3 est idéalement obtenue à partir d'un matériau bon conducteur thermique, relativement au matériau
 5 constituant la mèche primaire **2**, comme le **cuivre**, l'aluminium ou le nickel, ayant une conductivité thermique supérieure à 180 W/mK et de préférence supérieure à 380 W/mK.

Selon un aspect avantageux, le diamètre des pores de la
 10 couche fine est inférieur au diamètre des pores de la mèche primaire ; ce qui permet d'approvisionner le liquide depuis la mèche primaire et favoriser la libération de la vapeur en surface de la couche fine.

La base **10** de l'organe de réception présente une
 15 épaisseur **H1**, typiquement comprise entre 0,5 mm et 5 mm.

On remarque que le sommet **12** des projections est au contact de la mèche primaire dans un plan **P** sur une surface (**D3xZ2**) inférieure à **20 %** de la surface utile de la mèche primaire.

20 Comme visible à la figure 3, le sommet de la projection **12** et la mèche primaire sont continûment au contact l'un de l'autre le long de la direction **Z2** ; autrement dit, il n'y a pas d'interruption de contact entre le sommet des projections et la face inférieure de la mèche primaire.

25 Pour ce qui est de la surface de contact entre la mèche primaire et la couche fine, de chaque côté de la section, on a une largeur notée **D1** avec

$$\mathbf{D1} = \mathbf{EC1} / \cos(\alpha).$$

30 La surface totale contactée entre la mèche primaire et la plaque de réception revêtue est donc représentée **D2** :

$$\mathbf{D2} = \mathbf{D1} + \mathbf{D3} + \mathbf{D1}$$

On note que **D2** s'étend typiquement sur 10% à 50% de la largeur de base **W**. Il n'est pas exclu de monter jusqu'à 80%
 35 dans le cas où l'assemblage de la mèche primaire sur

l'ensemble des dents est réalisé avec des congés de raccordement (Fig. 10 partie droite). Cette configuration est intéressante dans le cas d'un besoin de tenue mécanique importante ou d'un drainage accru du liquide diphasique.

5 Par ailleurs, $D_3 < 0,3$ mm.

Par ailleurs, il est possible d'avoir $D_3 = 0$, voire un non contact entre la dent et la mèche primaire, à condition d'avoir une épaisseur de couche fine **3** entre le sommet et la mèche primaire **2**. Cette configuration permettrait d'augmenter l'effet d'isolation thermique de la zone de transfert liquide entre la mèche primaire et la couche fine.

Les Figures 6 et 7 présentent le fonctionnement de la surface de vaporisation à section progressive (c'est-à-dire la couche fine **3** de matériau poreux). L'épaisseur de cette projection **11** étant importante, son efficacité en tant qu'ailette est proche de 1 et sa résistance thermique est au moins un ordre de grandeur inférieure à celle due à la vaporisation à travers la couche fine **3**. Ce qui revient, en première approximation, à considérer que la température de la projection-ailette trapézoïdale varie peu.

La résistance thermique de la couche fine, saturée ou partiellement saturée de liquide, est inversement proportionnelle à son épaisseur qui varie, à titre d'exemple de façon linéaire entre **EC1** et **EC3** (Fig.4). En conséquence, le débit vaporisé localement dans la couche **3** suit une courbe **61** comme celle illustrée à la Figure 6.

Le débit local (exprimé en W/cm^2) est extrêmement important à l'endroit de plus faible épaisseur **EC3** c'est-à-dire à la base de la dent trapézoïdale **11**. Du fait de la géométrie proposée, la densité de flux de chaleur décroît au fur et à mesure que l'on se rapproche de la zone de contact **23** avec la mèche primaire. Dans l'exemple illustré qui correspond également à la Figure 4, au niveau du sommet **12** de projection, la densité de flux de chaleur est divisée

par 20 par rapport au flux pariétal, alors que sur les évaporateurs à projection droite ou bien à rainure réentrant de l'art antérieur, dépourvue de couche fine **3**, le flux de chaleur est multiplié par un facteur supérieur à 1.

On évite, ou on limite très fortement, ainsi un phénomène d'ébullition à l'interface entre le sommet 12 des projections et la mèche primaire 2. Grâce à ces dispositions, on obtient une interface d'évaporation capable de traiter un flux thermique supérieur à 50 Watts/cm² en moyenne sur la surface externe de l'évaporateur.

On atteint avantageusement des coefficients d'échange thermique de l'ordre de 30 000 W/(m²K) ou supérieur (référence : surface de contact de la plaque de réception).

Les inventeurs ont pu constater des puissances thermiques transférées par unité de surface (de la plaque de réception) au-delà de 110 W/cm².

Sur la Figure 7, on voit que la couche fine permet de transférer un débit important de liquide, très supérieur à la quantité de liquide vaporisé au niveau du sommet 12 de la dent; le taux de transfert de liquide dans la couche fine est illustré sur la courbe **62** ; cette courbe 62 représente le ratio $Q_{Lid}(h) / Q_{Liq}(L1)$.

L'abscisse de la Figure 7 est la hauteur normalisée, c'est-à-dire le ratio **$h/H2$** . H est une variable représentant la hauteur par rapport à la base. **H2** est la hauteur totale de la projection.

Le flux conductif **$QT(h)$** dans le corps de la dent **11**, par rapport à la hauteur normalisée, suit la courbe repérée **63**. ; cette courbe **63** représente le ratio $QT(h) / QT(0)$ ou exprimé $QT(h) / QT(L2)$ si on considère que l'abscisse L2 correspond à la base de la projection.

On note que la majorité de la puissance thermique transite par la partie inférieure de la dent et par la

portion la moins épaisse **32** de la couche fine **3**.

Cette proportion et les variations naturelles de l'épaisseur de la couche fine **3** lors de la fabrication ainsi que la présence de défauts peuvent faire varier ces profils. La perméabilité et la distribution des pores de la couche fine **3** sont adaptées en conséquence pour permettre la vaporisation au plus près de la base **10** afin de limiter la vaporisation dans la mèche primaire. De même il est possible de faire varier l'épaisseur de la couche fine de façon non linéaire pour améliorer les propriétés hydrauliques et/ou thermiques. La variation linéaire n'est qu'un cas illustratif et simplifié de la présente invention.

On remarque que la couche fine peut présenter, soit du fait des imperfections de fabrication, soit intentionnellement, une double porosité, à savoir des premières zones avec des pores plus grands comparés à d'autres zones où les pores sont plus petits ; dans le même esprit, il n'est pas exclu qu'il y ait des discontinuités dans la couche fine **3** c'est-à-dire des rainures ou des zones isolées dépourvues de couche fine **3** sur le flanc latéral **13** de la projection **11**.

Par ailleurs, on remarque que s'agissant de l'assemblage de l'évaporateur, la section trapézoïdale proposée permet une transmission robuste des efforts mécaniques, en particulier en compression (assemblage des modules de puissance par vissage).

Selon un autre mode de réalisation représenté à la figure 5, la disposition générale de l'évaporateur est cylindrique. La base **10** est un cylindre recevant le flux **Q_{in}**, toutefois on applique des dispositions similaires à celles déjà décrites, mutatis mutandis, pour les projections **11**, les rainures **4** et la couche fine **3**. La mèche primaire **2** se présente comme un manchon tubulaire. Le compartiment liquide **5** est formé par la zone centrale de

l'espace intérieur cylindrique. Le fonctionnement au niveau de l'interface de vaporisation et les avantages conférés par la couche fine ne sont pas décrits en détail, ils sont tout à fait similaires à ce qui a été décrit précédemment.

5 En référence à la figure 8, chacune des rainures ou chaque canal de vaporisation **4** est raccordée fluidiquement (en phase vapeur ou liquide) à un canal collecteur **40**, lui-même relié à la sortie de l'évaporateur (repère **Vap_Out**) qui est raccordée à la canalisation vapeur **8** externe.

10

 Selon un autre exemple de réalisation représenté à la figure 9, selon un plan de coupe analogue à celui de la figure 8, les projections **11** sont agencées sous forme de plot conique ou de plot pyramidal. Les canaux vapeur **4** sont
15 alors formés par les intervalles entre les plots. Selon une option avantageuse, l'épaisseur décroissante à partir du sommet des plots confère les avantages en termes d'efficacité déjà décrite précédemment.

 Selon un autre exemple de réalisation non représenté
20 aux figures, les projections peuvent être formées sous forme de nervures circulaires, dans le cas d'un évaporateur en forme de galette ou de disque.

 Sur la figure 10, sont représentés deux variantes, une
25 sur la partie gauche de la figure (10-L) une autre sur la partie droite de la figure (10-R).

 Sur la partie droite, selon un autre exemple de réalisation, l'épaisseur **EC** de la couche fine est quasi constante. D'une manière générale, dans cette
30 configuration, on choisira une épaisseur **EC** de la couche fine comprise entre 0,1 mm et 0,8 mm. Le fonctionnement et l'efficacité d'une telle configuration sont tout à fait satisfaisants sans toutefois égaler ceux de la couche fine à épaisseur décroissante tel que décrit ci-dessus. Dans une
35 région proche du fond de la rainure (repère **33**),

l'épaisseur de la couche fine diminue rapidement jusqu'à 0, en d'autres termes le fond de rainure n'est pas revêtu de matériau la plaque de base est nue.

Dans la partie au contact avec la mèche primaire, il peut être prévu une zone de congé **39** comme illustré par une zone représentée en pointillé, ce qui permet d'augmenter la surface de contact avec la mèche primaire. En effet on voit que la distance notée **D1'** est substantiellement supérieure à la distance notée **D1**.

Sur la partie gauche **10L**, selon un autre exemple de réalisation, l'épaisseur **EC** de la couche fine est constante, y compris en zone basse **34** et au fond de la rainure **35**. En poursuivant vers la gauche, on trouve la portion **36** de la même épaisseur qui recouvre le flanc de la dent suivante.

Une solution possible pour former une telle couche fine d'épaisseur constante (FIG. 10, coté 'L') est d'utiliser un treillis **38** sous forme d'une feuille métallique à matrice unidirectionnelle. Le treillis est conformé sur les projections y compris sur leurs flancs et se retrouve en contact intime avec l'organe de réception 1.

Pour ce processus d'assemblage particulier, le contact avec la zone basse 34 peut présenter une cavité de section globalement triangulaire.

Concernant le procédé de fabrication, et de façon non exhaustive, la préparation de la mèche primaire **2** consiste à découper une nappe de poreux d'épaisseur choisie aux bonnes dimensions, longueur et largeur. Pour l'organe de réception 1, on part d'une plaque de cuivre (ou de Nickel, d'inox ou d'aluminium) d'épaisseur **H1+H2** puis on procède à la formation des rainures et des projections par enlèvement de matière, soit par électro-érosion soit par usinage conventionnel ou encore par extrudage, emboutissage ou par matriçage.

Puis on forme la couche fine **3** à épaisseur non uniforme

(premier mode de réalisation), par exemple, par projection de plasma atmosphérique ou par fabrication additive (impression 3D) ou par pose d'un treillis comme illustré plus haut. Un assemblage par diffusion permet de lier les
5 deux surfaces poreuses au niveau du plan de contact **P**.

Un assemblage par contact sous compression est une autre option possible.

Il faut aussi remarquer que la couche fine **3** pourrait aussi recouvrir le sommet **12** de la dent avant assemblage de
10 la mèche primaire **2**.

REVENDICATIONS

- 1.** Évaporateur à capillaire pour système de transfert thermique, l'évaporateur comprenant :
- 5 - un organe de réception (1) des calories comprenant une base (10) et une pluralité de projections (11), chaque projection s'étendant à partir de la base jusqu'à un sommet (12), et dont la taille décroît avec l'éloignement par rapport à la base, chaque projection ayant des flancs
- 10 latéraux (13),
- une mèche primaire (2) en premier matériau poreux et présentant une face frontale (20) adjacente au sommet des projections, les flancs latéraux des projections délimitant avec la mèche primaire des espaces vides formant des canaux
- 15 de vapeur (4),
- caractérisé en ce que les flancs latéraux (13) des projections sont revêtus d'une couche fine (3) de matériau poreux, de préférence d'un second matériau différent du premier matériau.
- 20
- 2.** Évaporateur selon la revendication 1, dans lequel la couche fine (3) présente une épaisseur substantiellement uniforme.
- 25 **3.** Évaporateur selon la revendication 1, dans lequel la couche fine (3) présente une épaisseur non uniforme, la partie la plus épaisse (31) de la couche fine étant disposée au contact de la mèche primaire au voisinage du sommet de chaque projection, et l'épaisseur (EC) de ladite
- 30 couche fine diminuant en s'éloignant de la mèche primaire.
- 4.** Évaporateur selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel les projections sont formées sous forme de nervures rectilignes de section trapézoïdale.

5. Évaporateur selon la revendication 4, dans lequel les projections sont adjacentes les unes aux autres et chaque canal de vapeur présente une section généralement triangulaire avec la pointe dirigée vers la base de l'organe de réception.
6. Évaporateur selon la revendication 5, dans lequel la section est formée comme un trapèze isocèle symétrique, avec une base **W** et un petit côté **D3** tel que $D3 < 0,2 W$, et le petit côté **D3** a une taille $< 0,3 \text{ mm}$.
7. Évaporateur selon l'une des revendications 4 à 6, dans lequel le demi-angle d'ouverture au sommet α est inférieur à 45° et est de préférence compris entre 5° et 30° .
8. Évaporateur selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel la mèche primaire (2) est obtenue à partir d'un premier matériau mauvais conducteur thermique, comme la céramique, l'inox ou le téflon.
9. Évaporateur selon l'une des revendications 1 à 8, dans lequel la couche fine (3) est obtenue à partir d'un second matériau bon conducteur thermique, comme le cuivre, l'aluminium ou le nickel.
10. Évaporateur selon l'une des revendications 1 à 9, dans lequel le diamètre des pores de la couche fine (3) est inférieur au diamètre des pores de la mèche primaire (2).
11. **Système** de transfert thermique comprenant un évaporateur selon l'une des revendications précédentes, un condenseur, des conduites fluides avec soit un pompage par gravité à savoir une configuration thermosiphon, soit un pompage uniquement capillaire ou en combinaison avec un jet

ou un pompage mécanique.

FIG. 1

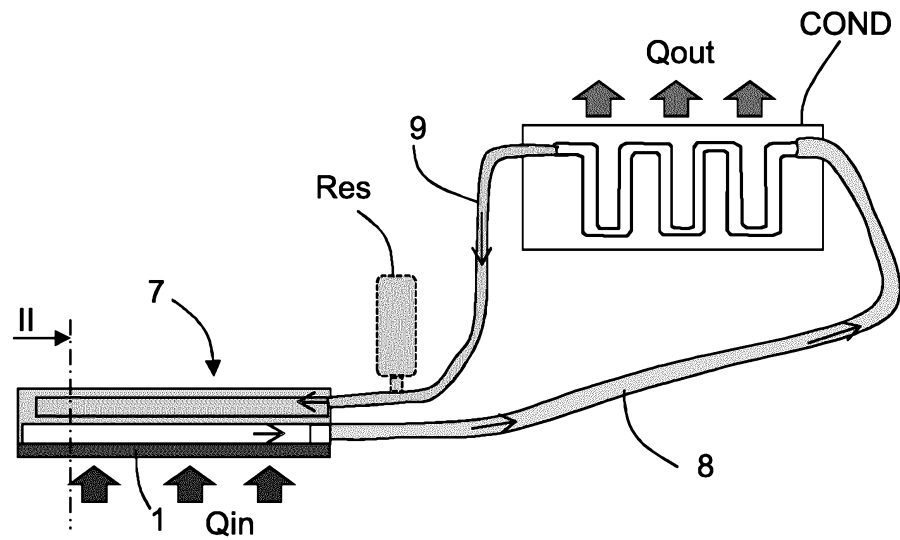


FIG. 2

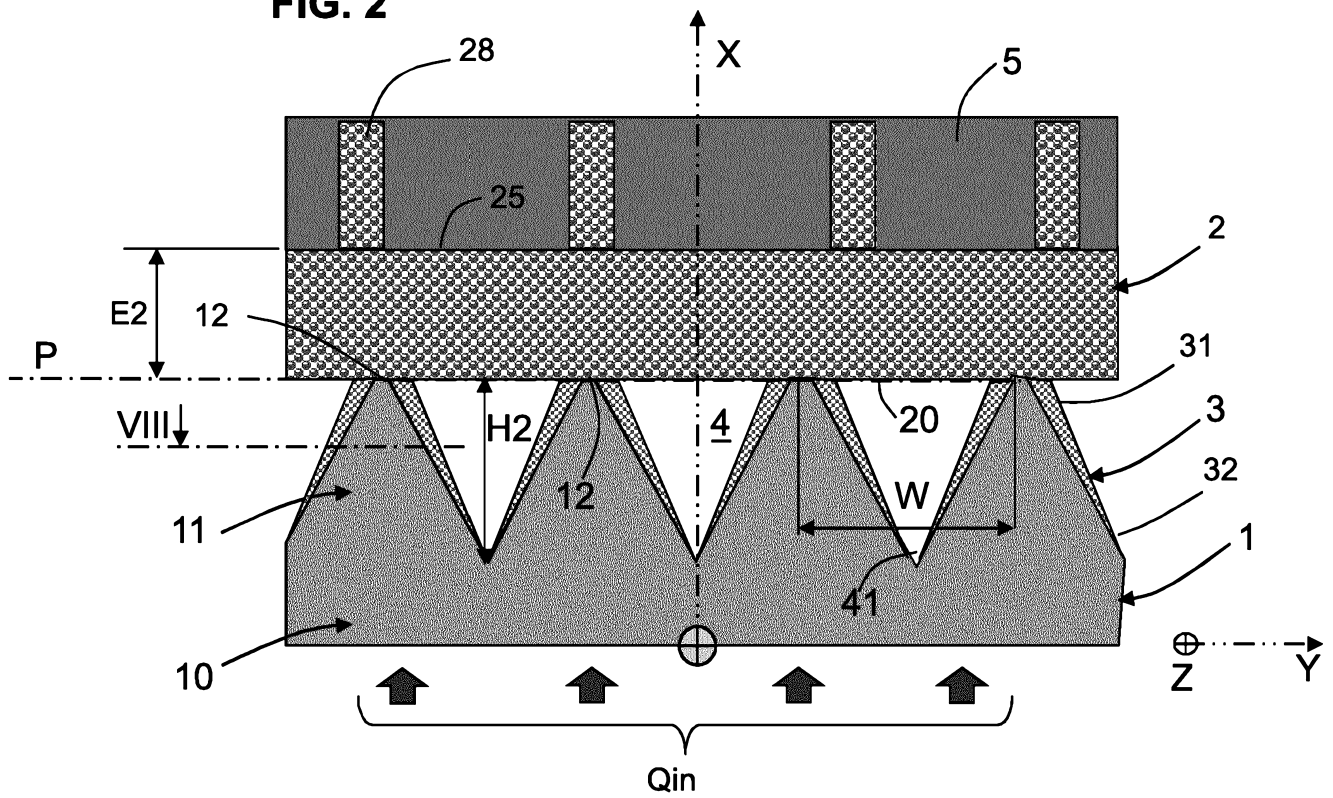


FIG. 3

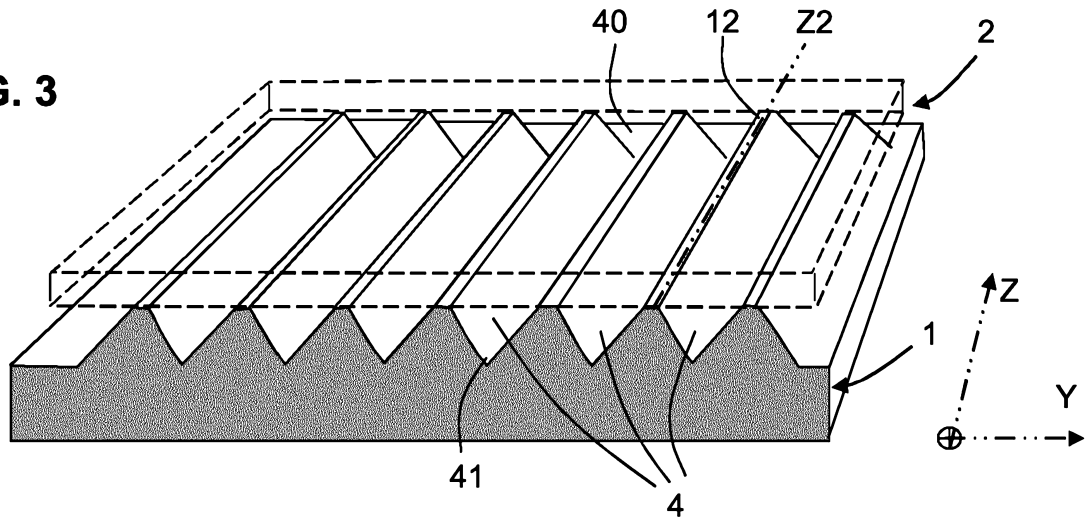


FIG. 4

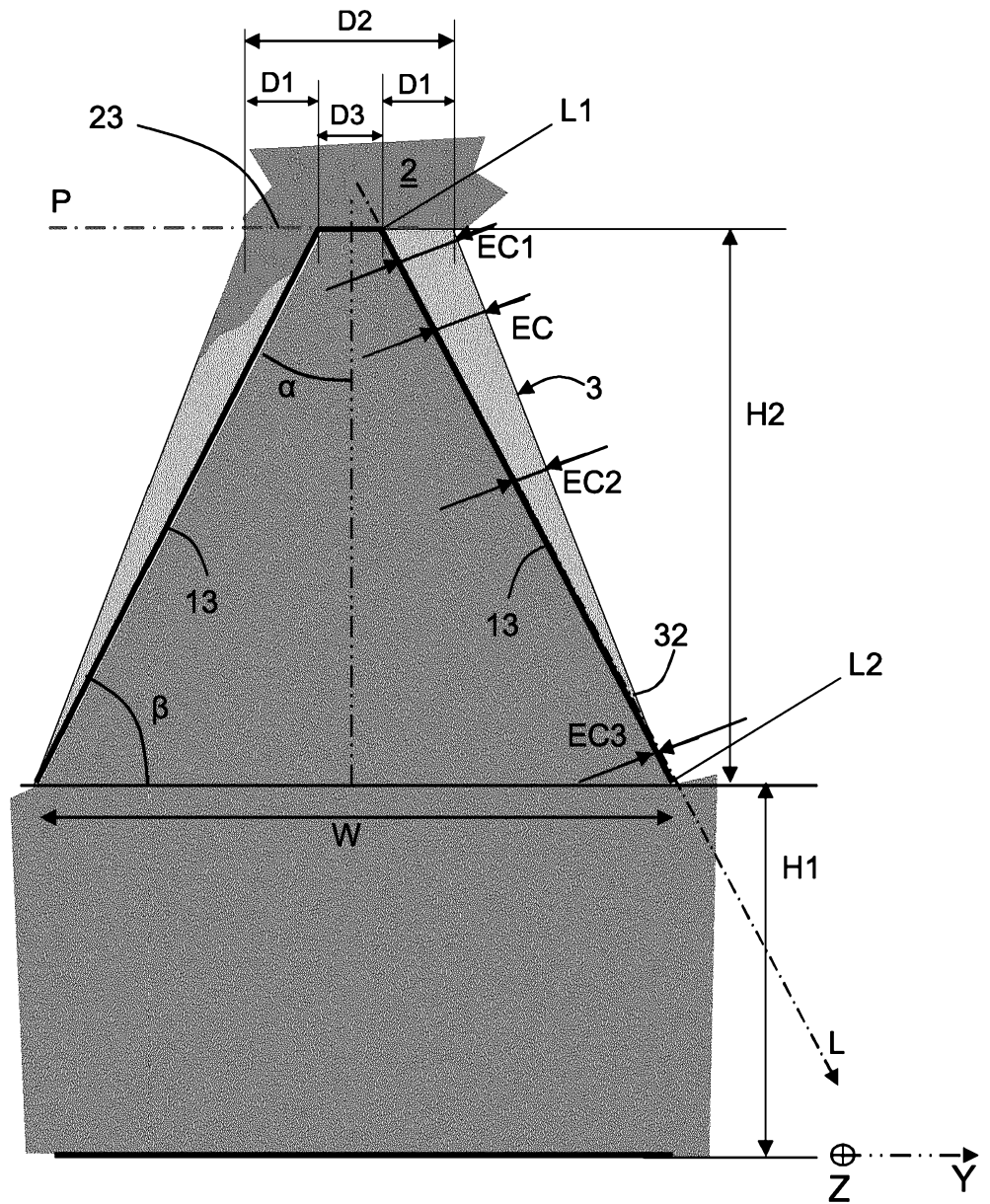


FIG. 5

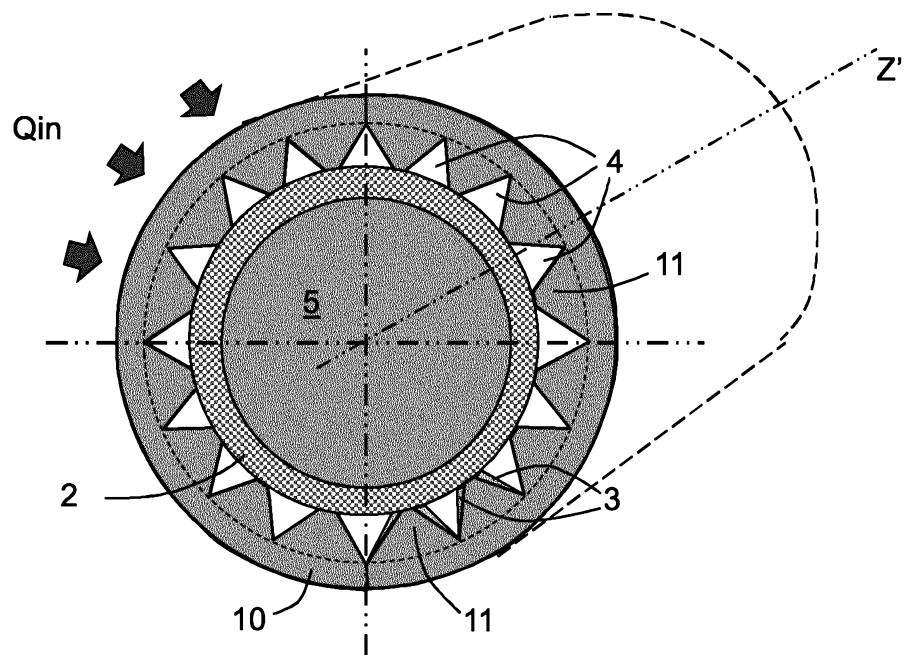


FIG. 6

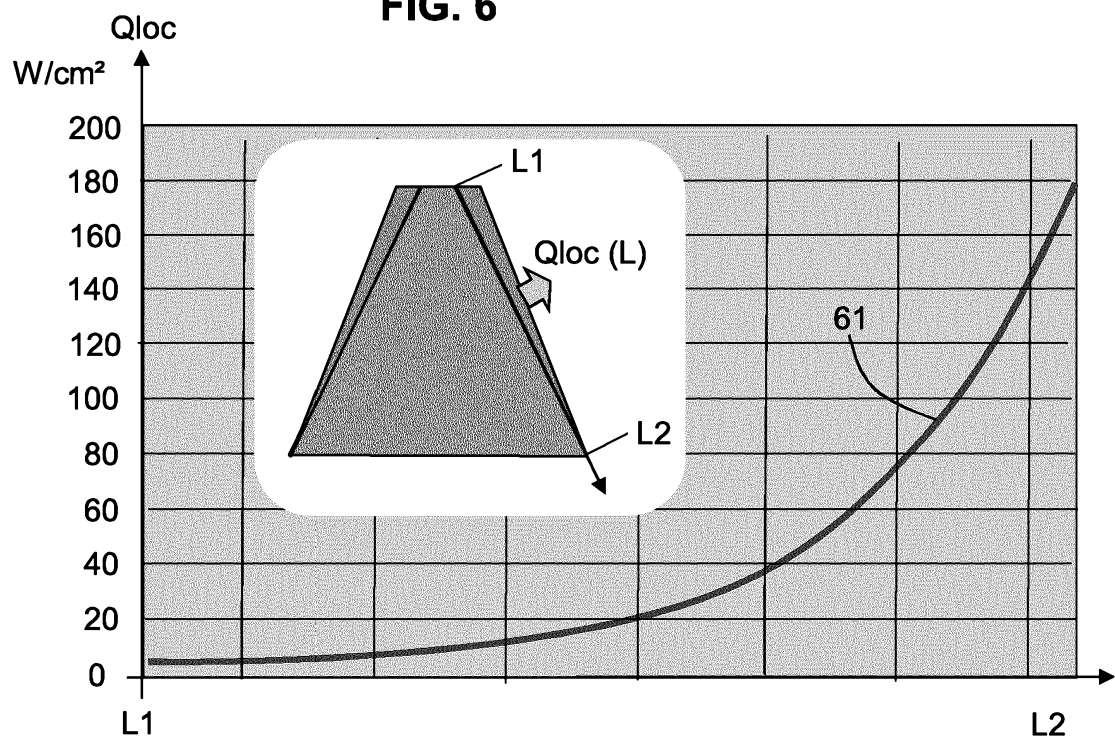


FIG. 7

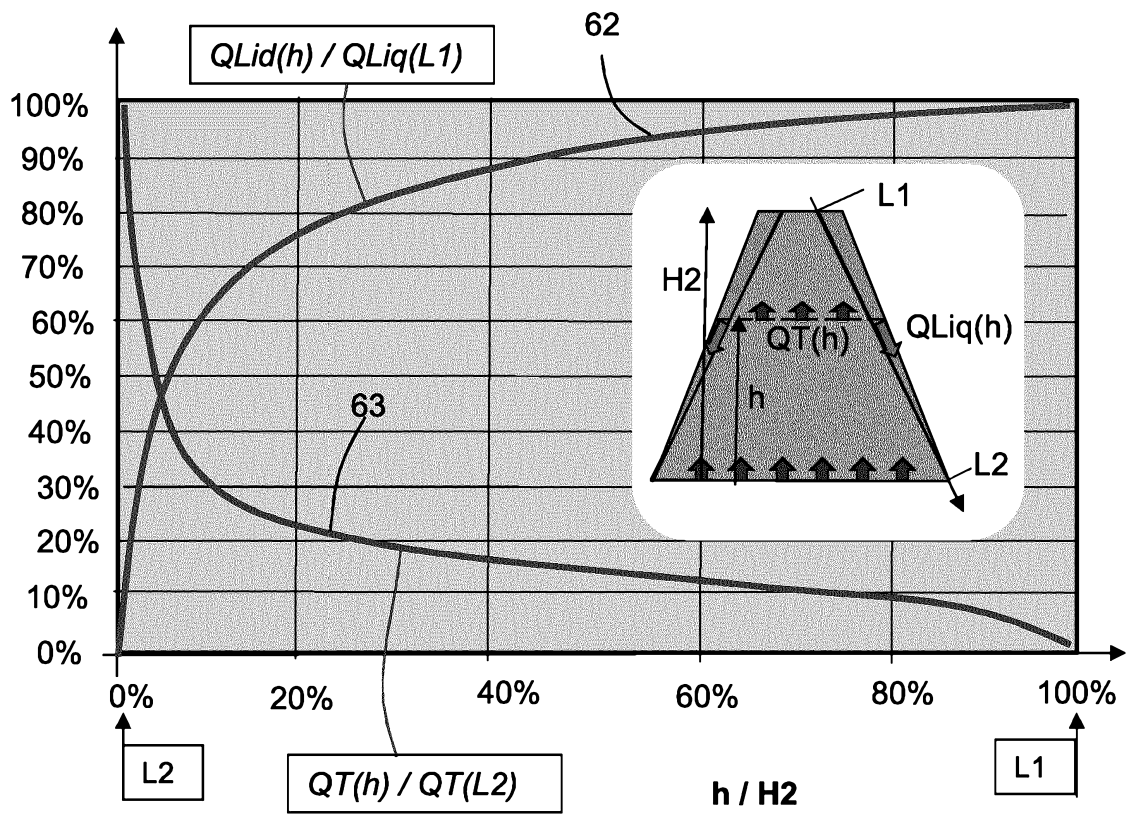


FIG. 8

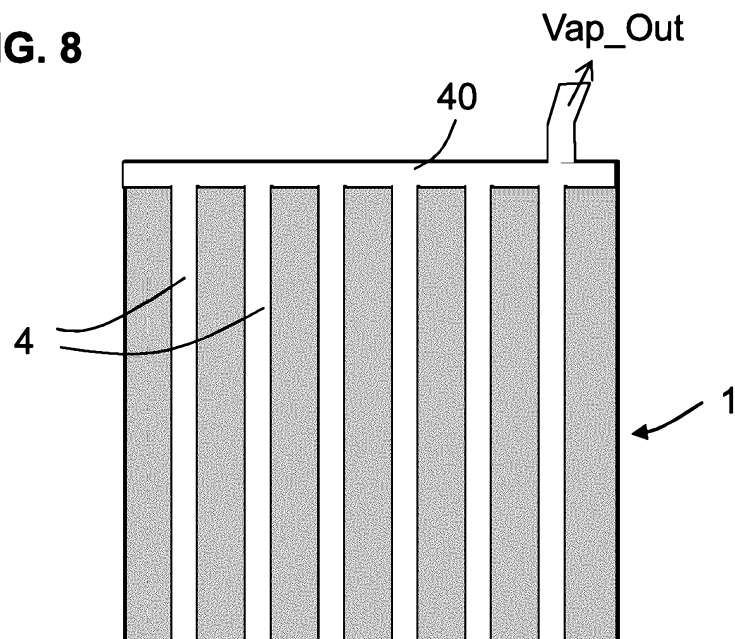


FIG. 9

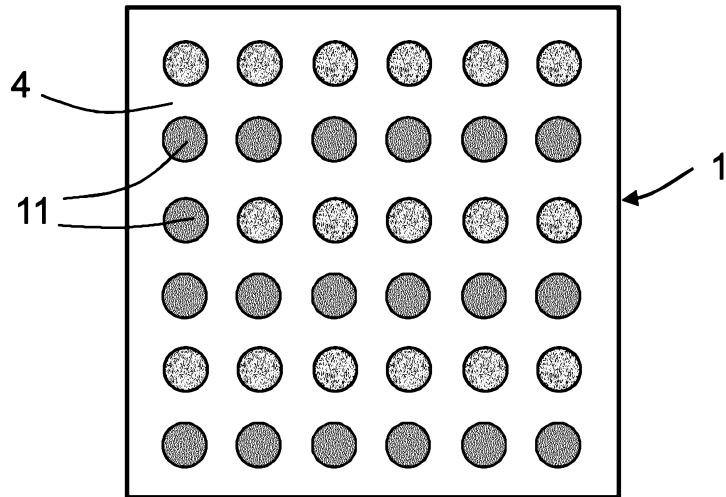
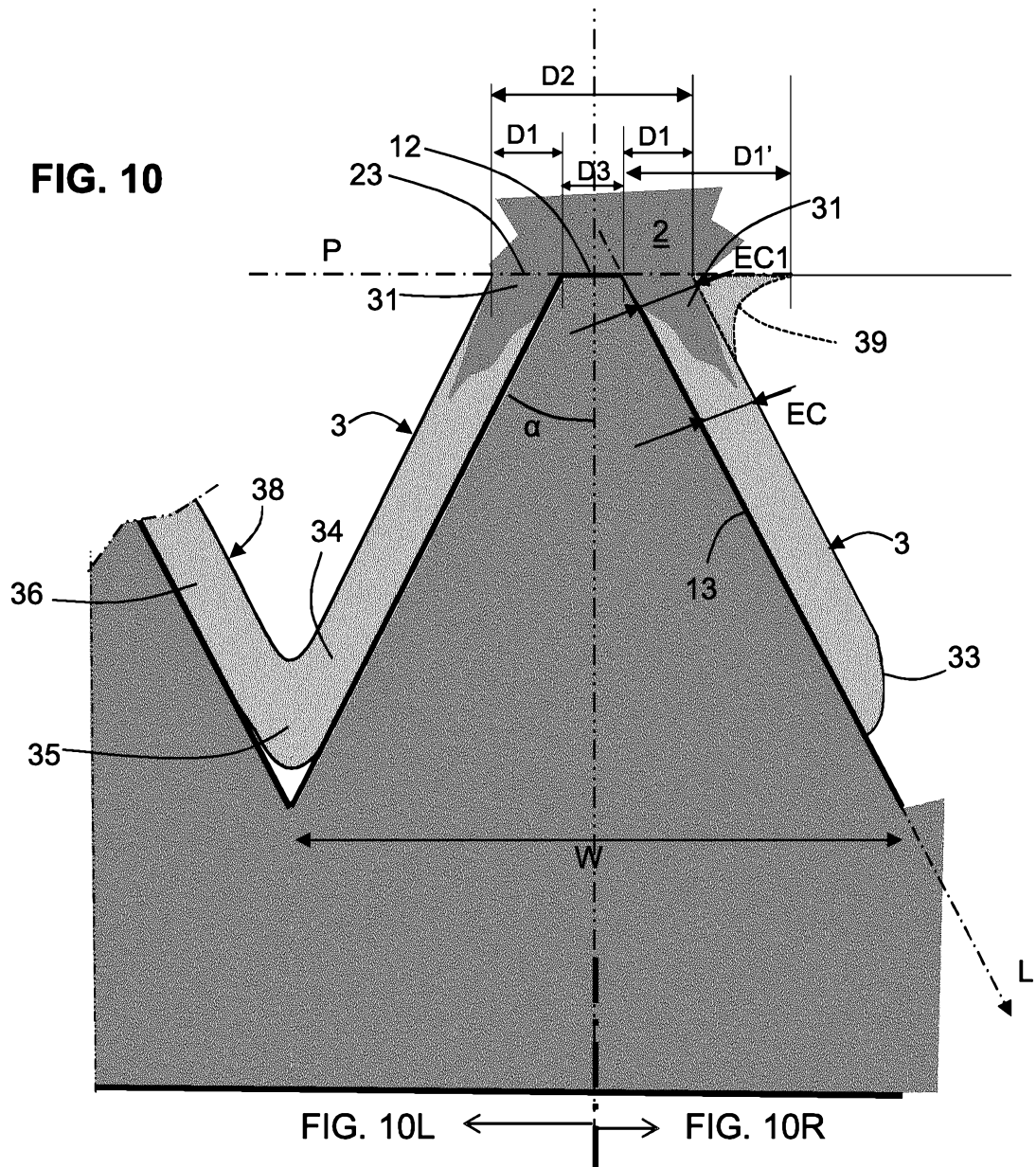


FIG. 10



RAPPORT DE RECHERCHE

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

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

US 2009/314472 A1 (KIM CHUL JU [KR] ET AL) 24 décembre 2009 (2009-12-24)

US 6 227 287 B1 (TANAKA HIROSHI [JP] ET AL) 8 mai 2001 (2001-05-08)

WO 2006/107492 A2 (MIKROS MFG INC [US]; VALENZUELA JAVIER A [US]) 12 octobre 2006 (2006-10-12)

JP H08 14785 A (MITSUBISHI CABLE IND LTD) 19 janvier 1996 (1996-01-19)

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

NEANT

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

NEANT