



Description

Titre de l'invention : Echangeur de chaleur à structure d'échange thermique améliorée

- [0001] La présente invention concerne un échangeur de chaleur du type à plaques et ailettes comprenant une structure d'échange thermique améliorée.
- [0002] La présente invention trouve notamment application dans le domaine de la séparation de gaz par cryogénie, en particulier de la séparation d'air par cryogénie (connue sous l'acronyme anglais « ASU » pour unité de séparation d'air) exploitée pour la production d'oxygène gazeux sous pression. En particulier, la présente invention peut s'appliquer à un échangeur de chaleur qui vaporise un débit liquide, par exemple de l'oxygène liquide, de l'azote et/ou de l'argon par échange de chaleur avec un gaz calorigène, par exemple l'air ou l'azote.
- [0003] Si l'échangeur de chaleur se trouve dans la cuve d'une colonne de distillation, il peut constituer un vaporiseur fonctionnant en thermosiphon pour lequel l'échangeur est immergé dans un bain de liquide descendant la colonne ou un vaporiseur fonctionnant en vaporisation à film alimenté directement par le liquide tombant de la colonne et/ou par une pompe de recirculation.
- [0004] La présente invention peut également s'appliquer à un échangeur de chaleur qui vaporise au moins un débit de mélange liquide-gaz, en particulier un débit de mélange à plusieurs constituants, par exemple un mélange d'hydrocarbures, par échange de chaleur avec au moins un autre fluide, par exemple du gaz naturel.
- [0005] La technologie couramment utilisée pour un échangeur est celle des échangeurs en aluminium à plaques et à ailettes ou ondes brasés, qui permettent d'obtenir des dispositifs très compacts offrant une grande surface d'échange.
- [0006] Ces échangeurs comprennent des plaques séparatrices entre lesquelles sont insérées des structures d'échange thermique, généralement des structures ondulées également appelées ondes, formées d'une succession d'ailettes ou jambes d'onde, constituant ainsi un empilement de passages pour les différents fluides à mettre en relation d'échange thermique.
- [0007] Les performances d'un échangeur sont liées au coefficient d'échange thermique des structures d'échange thermique se trouvant en contact avec les fluides. Le coefficient d'échange thermique d'une structure dépend notamment de la géométrie de la structure, de la nature du matériau la constituant, de la porosité de ce matériau, de sa rugosité et du régime d'écoulement des fluides.
- [0008] L'amélioration de la performance thermique d'un échangeur à volume et écart de température constants peut être réalisée notamment par l'augmentation de la surface

d'échange et/ou par l'augmentation du coefficient d'échange thermique.

- [0009] L'augmentation de la surface d'échange est généralement liée à la densité de l'onde utilisée, généralement exprimée en termes de nombre de jambes d'ondes par unité de longueur. Cependant, la possibilité d'augmentation est limitée puisque plus la densité de l'onde est grande, plus la perte de charge engendrée est grande. Il existe donc un compromis permettant d'augmenter la surface d'échange sans que celle-ci n'engendre une perte de charge trop importante. En particulier, dans le cas des échangeurs du type vaporiseur-condenseur, l'augmentation de la surface d'échange est limitée par la densité maximale de l'onde qui peut être utilisée dans les passages de vaporisation. En effet, pour une question de sécurité liée à la vaporisation de l'oxygène et aux risques de dépôts d'impuretés et de bouchage de canaux, il est préconisé d'utiliser des ondes droites sans obstacle en respectant une largeur de canal minimale.
- [0010] Concernant l'augmentation du coefficient d'échange thermique, celle-ci peut être obtenue en modifiant les propriétés physico-chimiques des surfaces d'échange. Ceci permet d'augmenter la surface effective d'échange et/ou de modifier les interactions entre le fluide et la surface, en changeant des propriétés de la surface considérée comme sa mouillabilité ou sa capacité à intensifier l'ébullition d'un fluide. On parle alors de surfaces intensifiées.
- [0011] Un problème qui se pose avec l'utilisation de surfaces intensifiées par texturation dans des échangeurs en aluminium brasés concerne l'assemblage d'éléments comportant de telles surfaces lors de la fabrication de l'échangeur. En effet, la liaison des éléments constitutifs de l'échangeur est réalisée par brasage avec utilisation d'un métal d'apport, appelé brasure ou agent de brasage, l'assemblage étant obtenu par fusion et diffusion de l'agent de brasage au sein des pièces à braser, sans fusion de celles-ci. La présence d'un revêtement poreux ou de reliefs au niveau de la zone de liaison affecte les propriétés mécaniques et/ou thermiques du joint, et donc celles de l'échangeur qui sont directement liées à la qualité du joint brasé.
- [0012] Pour tenter de remédier à ces inconvénients, une solution pourrait être de réaliser la texturation des structures d'échange thermique après que le brasage de ces structures dans l'échangeur a été réalisé.
- [0013] Toutefois, il est difficile d'accéder aux canaux formés par les structures d'échange dans les passages de l'échangeur et il devient alors impossible d'utiliser des techniques de texturation mécanique ou de revêtement par projection thermique. D'autres techniques de traitement de surface sont difficiles à mettre en œuvre. Par exemple, pour les techniques impliquant des étapes préalables de traitement thermique ou de dépôt d'une couche d'imprégnation pour assurer l'adhésion du revêtement, c'est l'échangeur entier qu'il faut traiter. Il y a alors des risques de boucher les canaux, de débraser des pièces de l'échangeur ou de créer des phases métallurgiques fragiles et

d'endommager la matrice brasée.

- [0014] Par ailleurs, il a été proposé de réaliser des texturations de surface sur les plaques séparatrices avant brasage. Mais dans ce cas, il n'y a pas de structure d'échange thermique brasée aux plaques et il est nécessaire de procéder à un recuit des plaques. Or, les structures d'échange ont aussi un rôle d'entretoises. Elles contribuent à la rigidité des passages de l'échangeur et à leur résistance à la compression lors du brasage sous vide de l'échangeur. De plus, les plaques recuites perdent de leur résistance mécanique. Il est alors nécessaire d'agencer des barres de renfort supplémentaires dans les passages et de doubler l'épaisseur des plaques.
- [0015] Lorsque l'on souhaite améliorer l'efficacité thermique d'un échangeur, il ne faut donc pas seulement considérer les performances en fonctionnement de l'échangeur mais aussi son mode de fabrication.
- [0016] D'autres solutions ont été proposées par la demanderesse pour accroître les performances thermiques d'un échangeur. FR-A-1762437 divulgue ainsi un échangeur dans lequel deux structures ondulées sont agencées tête-bêche dans un passage. La distance entre deux sommets successifs de chaque structure est augmentée de sorte que les sommets d'une onde fassent saillie dans les espaces formés entre les sommets de l'autre onde. L'inconvénient de cette solution est la difficulté à garantir les dimensions des canaux ainsi créés puisque les structures ondulées présentent une certaine souplesse dans leur direction d'ondulation. Une autre solution décrite dans FR-A-1762419 consiste à positionner dans un passage deux structures ondulées l'une sur l'autre en utilisant leurs sommets d'onde comme surfaces d'appui. Pour ce faire, les directions des canaux de chaque structure ne s'étendent pas parallèlement les uns aux autres mais forment un angle entre eux. Cette solution présente l'inconvénient de générer des canaux non débouchants car obturés par les barres de fermeture latérale du passage. Il s'ensuit un risque de dépôts d'impuretés et de bouchage des canaux. On connaît également de FR-A-2887020 un échangeur dans lequel plusieurs structures ondulées sont superposées dans un passage avec une plaque intermédiaire interposée entre ces structures. Les inconvénients d'une telle configuration sont un excès de matière première utilisée, une plus grande complexité d'assemblage de l'échangeur et une réduction de la section de passage de fluide, à hauteur de passage équivalente, ou une augmentation du volume de l'échangeur, à section de passage de fluide équivalente.
- [0017] La présente invention a pour but de résoudre en tout ou partie les problèmes mentionnés ci-avant, notamment de proposer un échangeur de chaleur du type à plaques et ailettes brasés à performances thermiques améliorées.
- [0018] La solution selon l'invention est alors un échangeur de chaleur du type à plaques et ailettes brasées comprenant une pluralité de plaques agencées parallèlement entre elles

et parallèlement à une direction longitudinale de façon à définir une série de passages pour l'écoulement d'un premier fluide à mettre en relation d'échange thermique avec au moins un deuxième fluide, au moins un passage de l'échangeur de chaleur étant formé entre deux plaques adjacentes et comprenant au moins une première structure ondulée et une deuxième structure ondulée superposées l'une sur l'autre suivant une direction d'empilement qui est orthogonale aux plaques, la première structure ondulée et la deuxième structure ondulée comprenant chacune au moins une série de jambes d'onde de forme plane reliées les unes aux autres alternativement par des sommets d'onde et des bases d'onde de forme plane, les jambes d'onde étant reliées aux sommets d'onde et aux bases d'onde respectivement par des arêtes de sommets et des arêtes de bases de forme arrondie, caractérisé en ce que les jambes d'ondes de la première structure ondulée et les jambes d'onde de la deuxième structure ondulée sont agencées en coïncidence les unes au-dessus des autres avec au moins une partie des bases d'onde de la première structure ondulée encastrées chacune entre deux sommets d'ondes successifs du deuxième élément intercalaire, de sorte que la première structure ondulée est en contact avec la deuxième structure ondulée au niveau des arêtes de bases de la première structure ondulée et des arêtes de sommets de la deuxième structure ondulée.

- [0019] Selon le cas, l'invention peut comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques énoncées ci-après.
- [0020] Les arêtes de sommets et les arêtes de bases présentent des rayons de courbures externes compris entre 0,5 et 0,9 mm.
- [0021] Ledit au moins un passage présente une hauteur totale mesurée suivant la direction d'empilement, la première structure ondulée et la deuxième structure ondulée présentant respectivement une première hauteur et une deuxième hauteur, mesurée suivant la direction d'empilement, la somme de la première hauteur et de la deuxième hauteur étant supérieure d'au moins 1%, de préférence supérieure de 1 à 10%, à la hauteur totale du passage.
- [0022] Ledit au moins un passage est formé entre une première plaque et une deuxième plaque adjacentes et présente une hauteur totale mesurée suivant la direction d'empilement, les bases d'onde de la première structure ondulée ayant des premières faces internes orientées vers la première plaque et des premières faces externes orientées vers la deuxième plaque, les sommets d'onde de la deuxième structure ondulée ayant des deuxièmes faces internes orientées vers la deuxième plaque et des deuxièmes faces externes orientées vers la première plaque, la première structure ondulée et la deuxième structure ondulée étant agencées de sorte que la première face externe des bases d'onde de la première structure ondulée est agencée à un premier niveau inférieur à un deuxième niveau de la deuxième face externe des sommets

d'onde de la deuxième structure ondulée.

- [0023] La distance entre la deuxième face externe des sommets d'onde de la deuxième structure ondulée et la première face externe des bases d'onde de la première structure ondulée et la, mesurée parallèlement à la direction d'empilement, représente au moins 1%, de préférence entre 1 et 10%, de préférence encore entre 1 et 5%, de la hauteur du passage.
- [0024] La première structure ondulée et la deuxième structure ondulée sont du même type et sont choisies parmi les types ondes droites, ondes à arêtes de hareng, ondes à décalage partiel, ondes à vagues.
- [0025] Les arêtes de bases de la première structure ondulée et les arêtes de sommets de la deuxième structure ondulée sont en contact direct ou via un matériau de brasage.
- [0026] La première structure ondulée et/ou la deuxième structure ondulée présentent une couche de dépôt poreux ou des microreliefs formés sur au moins une partie de leurs surfaces.
- [0027] La couche de dépôt poreux présente une porosité ouverte comprise entre 15 et 60 %, de préférence une porosité ouverte comprise entre 20 et 45 % (% en volume).
- [0028] Les jambes d'onde se succèdent suivant une direction d'ondulation de préférence la direction d'ondulation est parallèle aux plaques et perpendiculaire à la direction longitudinale.
- [0029] Ledit au moins un passage est délimité par deux barres de fermeture agencées de part et d'autre des première et deuxième structures ondulées suivant la direction d'ondulation, les première et deuxième structures ondulées étant agencées en butée contre lesdites barres de fermeture.
- [0030] En outre, l'invention concerne une installation de séparation d'air par distillation, caractérisée en ce qu'elle comprend au moins un échangeur de chaleur selon l'invention et en ce que l'installation comprend des moyens d'alimentation pour distribuer dans des passages de l'échangeur de l'oxygène liquide en tant que premier fluide et de l'azote gazeux en tant que deuxième fluide, ou inversement.
- [0031] La présente invention va maintenant être mieux comprise grâce à la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en référence aux schémas ci-annexés, parmi lesquels :
- [0032] [Fig.1] est une vue tridimensionnelle d'un échangeur à plaques brasées selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0033] [Fig.2] est une vue en coupe longitudinale d'un passage de l'échangeur de [Fig.1] selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0034] [Fig.3] est un agrandissement d'une partie de [Fig.2] et schématise un mode de réalisation possible de l'invention.
- [0035] [Fig.4] est un autre agrandissement d'une partie de [Fig.2] et schématise un mode de

réalisation possible de l'invention.

- [0036] [Fig.1] représente un mode de réalisation d'un échangeur de chaleur 1 du type à plaques brasées comprenant un empilement de plaques 2 qui s'étendent suivant deux dimensions, longueur et largeur, respectivement suivant la direction longitudinale z et la direction latérale x. Les plaques 2 sont disposées parallèlement les unes au-dessus des autres avec espacement et forment ainsi plusieurs ensembles de passages 3 pour un fluide F1, et pour au moins un autre fluide F2, F3 à mettre en relation d'échange de chaleur indirect via les plaques 2. La direction latérale x est orthogonale à la direction longitudinale z et parallèle aux plaques 2.
- [0037] Un échangeur de chaleur selon l'invention peut notamment faire partie d'une installation de séparation d'air par distillation cryogénique, en particulier du type à double colonne. En fonctionnement, un échange de chaleur s'opère dans l'échangeur entre de l'oxygène liquide en tant que fluide frigorigène et de l'azote gazeux en tant que fluide calorigène. Les plaques de l'échangeur forment une pluralité de passages de vaporisation destinés à l'écoulement de l'oxygène et de passages de condensation destinés à l'écoulement de l'azote. Les passages 3 décrits dans la présente demande peuvent aussi bien être des passages pour l'écoulement de l'oxygène ou de l'azote.
- [0038] De préférence, chaque passage 3 est de forme parallélépipédique et plate et configuré pour canaliser le premier fluide parallèlement à la direction longitudinale z. La direction longitudinale z définit une direction globale d'écoulement du premier fluide F1 dans les passages 3. L'écart entre deux plaques 2 successives, correspondant à la hauteur du passage, mesurée suivant la direction d'empilement y des plaques 2, est petit devant la longueur et la largeur de chaque plaque successive. Les passages 3 sont bordés par des barres de fermeture 6 qui n'obturent pas complètement les passages mais laissent des ouvertures libres pour l'entrée ou la sortie des fluides correspondants.
- [0039] L'échangeur 1 comprend des collecteurs de forme semi-tubulaire 7, 5 munis d'ouvertures 10 pour l'introduction des fluides dans l'échangeur 1 et l'évacuation des fluides hors de l'échangeur 1. Ces collecteurs présentent des ouvertures moins larges que les passages. Des zones de distribution agencées en aval des collecteurs d'entrée et en amont des collecteurs de sortie servent à canaliser de façon homogène les fluides vers ou depuis toute la largeur des passages.
- [0040] De façon connue en soi, au moins une partie des passages 3 d'un échangeur à plaques et ailettes comprend des structures d'échange thermique 8 de forme ondulée qui s'étendent avantageusement suivant la largeur et la longueur des passages de l'échangeur, parallèlement aux plaques 2. Les structures 8 sont sous la forme de tôles ondulées. On appelle ailettes ou jambes d'onde les parties de l'onde qui relient les sommets et les bases successifs de la structure ondulée.
- [0041] Tout ou partie des passages 3 de l'échangeur 1 sont pourvus de structures ondulées 8

dont les jambes d'ondes délimitent, au sein du passage 3, une pluralité de canaux. En fonctionnement, le premier fluide s'écoule sur la largeur du passage 3, mesurée suivant la direction latérale x, entre une entrée et une sortie du passage 3 situées à deux extrémités opposées suivant la longueur du passage 3, mesurée suivant la direction longitudinale z. D'autres agencements et/ou directions d'écoulement des fluides sont envisageables.

- [0042] De préférence, les structures 8 sont liées par brasage aux plaques séparatrices de l'échangeur. Avantageusement, la liaison est réalisée par brasage sous vide avec utilisation d'un métal d'apport, appelé brasure ou matériau de brasage, l'assemblage étant obtenu par fusion et diffusion du matériau de brasage au sein des pièces à braser, sans fusion de celles-ci. Le matériau de brasage est de préférence formé d'un matériau métallique ayant une température de fusion inférieure à celle des matériaux constitutifs des pièces de l'échangeur. Celles-ci sont de préférence formées d'aluminium ou d'un alliage d'aluminium.
- [0043] [Fig.2] est une vue en coupe transversale d'un passage 3 formé entre deux plaques 2 adjacentes, c'est-à-dire directement voisines dans la série de plaques formant l'empilement.
- [0044] Selon l'invention, au moins une première structure ondulée 8 et une deuxième structure ondulée 9 sont agencées dans le passage 3. Etant entendu que tout ou partie des passages 3 peuvent être configurés selon l'invention et qu'un même passage 3 peut comprendre plus de deux structures superposées selon la présente description. La description se limite au cas de deux structures par souci de concision mais tout ou partie des caractéristiques mentionnées pour les premières et deuxièmes structures peuvent s'appliquer à une structure ondulée supplémentaire superposée en coïncidence avec première et deuxième structures.
- [0045] Comme on le voit sur [Fig.2], les structures 8, 9 sont superposées l'une sur l'autre suivant une direction d'empilement y qui est orthogonale aux plaques 2. La première structure ondulée 8 et la deuxième structure ondulée 9 comprenant chacune au moins une série de jambes d'onde 83, 93 reliées les unes aux autres alternativement par des sommets d'onde 81, 91 et des bases d'onde 82, 92.
- [0046] Les jambes d'ondes, les sommets d'ondes et les bases d'ondes sont de forme plane. Les sommets d'ondes et les bases d'ondes forment des bandes qui s'étendent parallèlement entre elles et aux plaques 2. Les jambes d'onde 83, 93 sont reliées aux sommets d'onde par des arêtes de sommets 84, 94 et les jambes d'onde 83, 93 sont reliées aux bases d'onde par des arêtes de bases 85, 95. Lesdites arêtes de sommets et de base présentent une forme arrondie. Les jambes d'onde se succèdent suivant une direction D dite d'ondulation et s'étendent dans leur longueur. Les jambes d'onde sont de forme longiligne et s'étendent parallèlement entre elles et globalement de façon or-

thogonale à la direction d'ondulation D.

- [0047] Les jambes d'ondes 83 de la première structure ondulée 8 et les jambes d'onde 93 de la deuxième structure ondulée 9 sont agencées en coïncidence les unes au-dessus des autres avec des bases d'onde 82 du premier élément intercalaire 8 encastrées entre des sommets d'ondes 91 successifs du deuxième élément intercalaire 9 de sorte que la première structure ondulée 8 est en contact avec la deuxième structure ondulée 9 au niveau des arêtes de bases 85 de la première structure ondulée 8 et des arêtes de sommets 95 de la deuxième structure ondulée 9.
- [0048] La structure résultante offre ainsi une plus grande surface d'échange. Du fait de la superposition et de l'alignement de leurs jambes d'ondes respectives et de la courbure existant au niveau des arêtes de sommets et de bases, les structures ondulées 8, 9 s'emboîtent légèrement l'une dans l'autre et des zones de contact s'établissent entre les première et deuxième structures au niveau de leurs arêtes. On maximise ainsi la surface d'échange supplémentaire créée sans pour autant augmenter la quantité de matière première devant être utilisée et tout en assurant la rigidité mécanique de la structure d'échange résultante.
- [0049] En comparaison avec un passage munie d'une seule structure, les structures superposées offrent une surface d'échange supplémentaire correspondant aux surfaces des bases d'onde de la première structure ondulée et aux surfaces des sommets d'onde de la deuxième structure ondulée. L'agencement en coïncidence des jambes d'onde les unes au-dessus des autres permet que les bases et les sommets d'onde se succèdent les uns après les autres sans se chevaucher, ce qui crée une surface d'échange supplémentaire quasi-continue avec une augmentation optimale de la surface d'échange de toute la largeur du passage, sans besoin d'ajouter une plaque dans le passage. On évite ainsi d'alourdir excessivement la structure de l'échangeur et de trop réduire la section transverse des canaux pour la circulation de fluide.
- [0050] Un autre avantage de cet arrangement est qu'il est formé, pour une même densité d'onde, de structures ondulées de hauteurs réduites, ce qui rend l'intérieur des canaux formés entre les jambes d'ondes et les jambes d'onde des canaux formés plus accessibles et permet de réaliser un éventuel revêtement de surface de façon plus aisée et plus homogène sur toute la surface des structures.
- [0051] Avantageusement, les arêtes de sommets 84, 94 et les arêtes de bases 85, 95 présentent des rayons de courbures externes compris entre 0,5 et 0,9 mm. De telles valeurs permettent un positionnement et un guidage plus facile des structures ondulées superposées l'une sur l'autre de telle sorte que les bases d'onde de la première structure et les sommets d'onde de la deuxième structure s'emboîtent légèrement et d'une manière contrôlée dans le canal ouvert de la structure lui faisant face.
- [0052] En outre, ces rayons de courbure permettent un emboîtement contrôlé des structures et

une augmentation de leur surface de mise en contact, ce qui permet de réaliser une meilleure brasure à ces points de contact, conduisant ainsi à un meilleur contact thermique et à une meilleure tenue mécanique de l'assemblage.

- [0053] Dans le cas où un matériau de brasage est utilisé pour assembler les structures, le matériau de brasage peut former un congé 11 de part et d'autre de la surface de mise en contact des arêtes courbes, comme illustré sur [Fig.3].
- [0054] Selon le cas, les bases d'onde 82 de la première structure ondulée 8 peuvent être encastrées entre des sommets d'ondes de la deuxième structure 9 sur des profondeurs d'encastrement variable. Cette profondeur d'encastrement peut se caractériser par le positionnement relatif des bases de la première structure 8 et des sommets d'ondes de la deuxième structure 9 dans la hauteur du passage 3.
- [0055] En référence à [Fig.4], les bases d'onde 82 de la première structure 8 présentent des premières faces internes 82a orientées vers une première plaque 2a et des premières faces externes 82b orientées vers une deuxième plaque 2b adjacente à la première plaque 2a. Les sommets d'onde 91 de la deuxième structure 9 présentent des deuxièmes faces internes 91a orientées vers la deuxième plaque 2b et des deuxièmes faces externes 91b orientées vers la première plaque 2a. En suivant la direction d'empilement y, la première plaque 2a est agencée à un niveau supérieur à celui de la deuxième plaque 2b. De préférence, en suivant la direction d'empilement y, la première structure 8 et la deuxième structure 9 sont agencées de sorte que la première face externe 82b des bases d'onde 82 de la première structure 8 est agencée à un premier niveau inférieur à un deuxième niveau de la deuxième face 91b externe des sommets d'onde 91 de la deuxième structure 9.
- [0056] La profondeur d'encastrement peut se définir comme la différence, i.e. l'écart (en valeur absolue), entre le premier niveau et le deuxième niveau, référencée « e » sur [Fig.4]. De préférence, la profondeur d'encastrement e représente au moins 1% de la hauteur H du passage, de préférence entre 1 et 10%, en particulier entre 1% et 5% de la hauteur H. Ces valeurs offrent un bon compromis entre une surface de contact suffisante entre les arêtes d'onde et une bonne tenue mécanique de l'ensemble / maintien des structures entre elles. Notons qu'une profondeur d'encastrement égale à l'épaisseur des structures, i. e. de leurs sommets et bases d'onde, signifie que les bases d'onde de la première structure 8 et les sommets d'onde de la deuxième structure sont alignés dans la hauteur du passage.
- [0057] La première structure ondulée 8 et la deuxième structure ondulée 9 comprennent au moins une série de jambes d'ondes agencées périodiquement avec un pas identique pour les deux structures. La première structure ondulée 8 et de la deuxième structure ondulée 9 présentent respectivement une première hauteur h1 et une deuxième hauteur h2, mesurées suivant la direction d'empilement y. Les structures peuvent présenter des

hauteurs h_1 et h_2 identiques mais pas nécessairement. De préférence, les bases d'onde et les sommets d'onde des première structure ondulée 8 et deuxième structure ondulée 9 présentent une épaisseur identique, l'épaisseur étant mesurée parallèlement à la direction d'empilement y . Les bases d'onde et les sommets d'onde des structures 8, 9 peuvent présenter une épaisseur comprise entre 0,2 et 0,5 mm.

- [0058] De préférence, ledit au moins un passage 3 présente une hauteur totale H mesurée suivant la direction d'empilement y , la première structure ondulée 8 et la deuxième structure ondulée 9 la somme de la première hauteur h_1 et de la deuxième hauteur h_2 étant supérieure d'au moins 1%, de préférence de 1 à 10% à la hauteur totale H du passage 3.
- [0059] Ce surdimensionnement est défini de manière à compenser la perte de hauteur totale lors du léger emboîtement des deux structures ondulées, de sorte que la hauteur de la structure obtenue après superposition soit sensiblement égale à la hauteur du passage 3, ce qui assure l'intégrité structurelle de la matrice de l'échangeur et de ses canaux internes.
- [0060] De préférence, la première structure ondulée 8 et la deuxième structure ondulée 9 sont du même type, le type de structure étant choisi parmi les structures du type ondes droites, les ondes à arêtes de hareng (« *herringbone* » en anglais), les ondes à décalage partiel (« *serrated* » en anglais), les ondes à vagues. Les ondes peuvent être perforées ou non.
- [0061] Selon un mode de réalisation, chacune des première et deuxième structures ondulées est une onde droite présentant une seule série de jambes d'onde à surfaces planes, chaque jambe formant une bande qui s'étend dans toute la largeur ou la longueur du passage. L'utilisation d'ondes droites est avantageuse notamment dans des passages d'échangeur prévus par l'écoulement et la vaporisation d'oxygène car leur géométrie limite les risques de dépôts d'impuretés et de bouchage des canaux.
- [0062] Selon un autre mode de réalisation de l'invention, chacune des première et deuxième structures ondulées est une onde à décalage partiel présentant plusieurs séries de jambes d'onde qui se succèdent suivant la direction d'ondulation D , au moins une série de jambes d'ondes étant positionnée en décalage suivant la direction d'ondulation D par rapport aux jambes d'onde d'une autre série.
- [0063] De préférence, les structures ondulées 8, 9 sont disposés en configuration dite « *easyway* » dans le passage 3, c'est-à-dire que les jambes d'onde 83, 93 s'étendent globalement suivant la direction d'écoulement du premier fluide dans le passage 3, qui est parallèle à la direction longitudinale z en références à [Fig.1] et [Fig.2]. Dans ce cas, la direction d'ondulation D est parallèle aux plaques 2 et perpendiculaire à la direction longitudinale z . A noter qu'en fonctionnement de l'échangeur, la direction d'écoulement du premier fluide est de préférence verticale, le sens d'écoulement

pouvant être ascendant ou descendant.

- [0064] Selon le mode de réalisation particulier illustré sur [Fig.2], les sommets et les bases d'onde des structures ondulées sont de forme plane et s'étendent parallèlement entre eux et perpendiculairement aux jambes d'onde 123, 223. Les canaux formés entre deux jambes d'onde successives et un sommet ou une base agencé entre lesdites jambes d'onde successive de chaque produit ondulé, présentent ainsi des sections transversales de forme générale carrée ou rectangulaire.
- [0065] Avantageusement, ledit au moins un passage 3 est délimité par deux barres de fermeture 6 agencées de part et d'autre des première et deuxième structures ondulées 8, 9 suivant la direction d'ondulation D, comme par exemple montré partiellement en [Fig.2]. Les première et deuxième structures ondulées 8, 9 sont dimensionnées de façon à venir en butée contre lesdites barres de fermeture 6. Ainsi, lors de la superposition des structures ondulées, les canaux formés entre les jambes d'ondes des structures de peuvent pas s'élargir plus et les structures ne peuvent pas s'emboîter plus que souhaité.
- [0066] Selon le cas, les arêtes de bases 85 de la première structure ondulée 8 et les arêtes de sommets 95 de la deuxième structure ondulée 9 peuvent être en contact direct ou via un matériau de brasage. Les structures ondulées 8, 9 peuvent ainsi être formées à partir de tôles colaminées comprenant une feuille centrale dont l'une et/ou l'autre des faces est revêtue d'une couche de matériau de brasage. Selon un autre mode de réalisation, le matériau de brasage peut prendre la forme d'un feuillard superposé à la structure. La couche de matériau de brasage peut aussi être déposée par pulvérisation ou par application au pinceau d'une suspension. Les plaques 2 de l'échangeur peuvent également comprendre un tel matériau de brasage sous forme de colaminage ou de dépôt de surface.
- [0067] On pourra également envisager d'intercaler un feuillard de matériau de brasage entre les structures ondulées 8, 9 afin de lier thermiquement et mécaniquement les deux structures. De préférence, le feuillard a une épaisseur de 10 à 100 μm .
- [0068] Etant noté que les structures ondulées peuvent seulement être mis en contact sans nécessiter de brasage. C'est le cas notamment lorsqu'en fonctionnement, le passage 3 canalise un premier fluide dont la pression est en équipression avec l'environnement extérieur de l'échange, comme dans le cas d'un vaporiseur fonctionnant en thermosiphon, ou relativement faible, comme dans le cas d'un vaporiseur fonctionnant en vaporisation à film.
- [0069] Selon un mode de réalisation particulier, la première structure ondulée 8 et/ou la deuxième structure ondulée 9 présentent une texturation de surface sous la forme d'une couche de dépôt poreux ou des microreliefs formés sur au moins une partie de leurs surfaces, de préférence sur la totalité ou quasi-totalité des surfaces. Une telle tex-

turation de surface permet d'améliorer encore les performances d'échange thermique de la superposition de structures ondulées.

- [0070] Il est à noter que les structures ondulées peuvent présenter une ou plusieurs formes prédéterminées de texturation de surface réparties sur différentes zones de sa surface, étant entendu qu'une texturation de surface peut aussi bien être réalisée dans les surfaces du matériau constitutif des éléments intercalaires qu'y être déposée, c'est-à-dire résulter d'un apport de matière supplémentaire sur les surfaces des éléments intercalaires. De préférence, les structures ondulées comprennent des substrats massifs, en particulier des substrats non-poreux, sur lesquels on forme ladite texturation de surface.
- [0071] Dans le cadre de l'invention, la texturation de surface peut résulter d'un revêtement de surface déposé sur l'élément ou bien d'une modification de l'état de surface dudit élément pièces.
- [0072] En particulier, la texturation de surface peut résulter d'un revêtement de surface déposé sur les substrats des éléments intercalaires, en particulier un revêtement déposé par voie liquide, notamment par trempage, pulvérisation ou par voie électrolytique, par voie sèche, notamment par dépôt chimique en phase vapeur (en anglais *Chemical Vapor Deposition* ou *CVD*) ou dépôt physique en phase vapeur (en anglais *Physical Vapor Deposition* ou *CVD*), ou par projection thermique, en particulier par flamme ou par plasma.
- [0073] La modification de l'état de surface desdites pièces pourra être obtenu par un traitement chimique ou par un traitement mécanique, par exemple par sablage, rainurage....
- [0074] Selon un mode préféré de réalisation, la texturation de surface est sous la forme d'une structure poreuse, de préférence une couche poreuse. La structure poreuse peut par exemple être formée d'un dépôt de particules d'aluminium légèrement frittées, de filaments d'aluminium enchevêtrés, de particules d'aluminium semi fondues collées les unes aux autres, telles les particules d'aluminium qui sont obtenues après projection que l'on obtient en projection thermique par flamme.
- [0075] De préférence, la texturation de surface présente une porosité ouverte comprise entre 15 et 60%, de préférence entre 20 et 45%, de préférence encore une porosité ouverte comprise entre 25 et 35% (% en volume). A noter que la porosité ouverte est définie comme le rapport entre le volume des pores ouverts, c'est-à-dire les pores communiquant fluidiquement avec l'environnement extérieur dans lequel se situe l'élément intercalaire considéré, et le volume total de la structure poreuse.
- [0076] De façon alternative, la texturation de surface peut être sous la forme de reliefs, ou motifs, imprimés ou réalisés dans ou sur le matériau constitutif du substrat d'un élément intercalaire. De préférence, ces reliefs définissent, en coupe transversale, des

cavités ouvertes à la surface de l'élément. Par exemple, des micro-reliefs ou taille ou morphologie diverses, tels des gorges, discrètes ou ininterrompues, des stries, des protubérances, ... pourront être formés ou déposés à la surface de l'élément considéré. En particulier, les reliefs formant la texturation de surface peuvent être réalisés par usinage laser ou mécanique et/ou chimique.

[0077] De préférence, les premier et deuxième produits ondulés 221, 222 ont des densités d'ondes, définies comme le nombre de jambes d'onde par unité de longueur mesuré le long de la direction d'ondulation, comprises entre 6 et 18 jambes par 2,54 centimètres (unité équivalente à la désignation « fins per inch » en anglais ou « FPI »).

[0078] A titre d'exemple, au moins un passage 3 de l'échangeur peut comprendre une première et une deuxième structures ondulées superposées ayant chacune une densité d'ondes de 14 jambes par 2,54 centimètres, une hauteur de 2,5 mm et une épaisseur de 0,2 mm, conduisant à un gain de surface d'échange de 22% par rapport à l'agencement d'une seule structure ondulée de même densité, même épaisseur et de hauteur 5 mm. Selon un autre exemple de réalisation, au moins un passage 3 de l'échangeur peut comprendre une première, une deuxième et une troisième structures ondulées superposées ayant chacune une densité d'ondes de 14 jambes par 2,54 centimètres, une hauteur de 1,66 mm et une épaisseur de 0,2 mm, conduisant à un gain de surface d'échange de 44% par rapport à l'agencement d'une seule structure ondulée de même densité, même épaisseur et d'une hauteur de 5 mm.

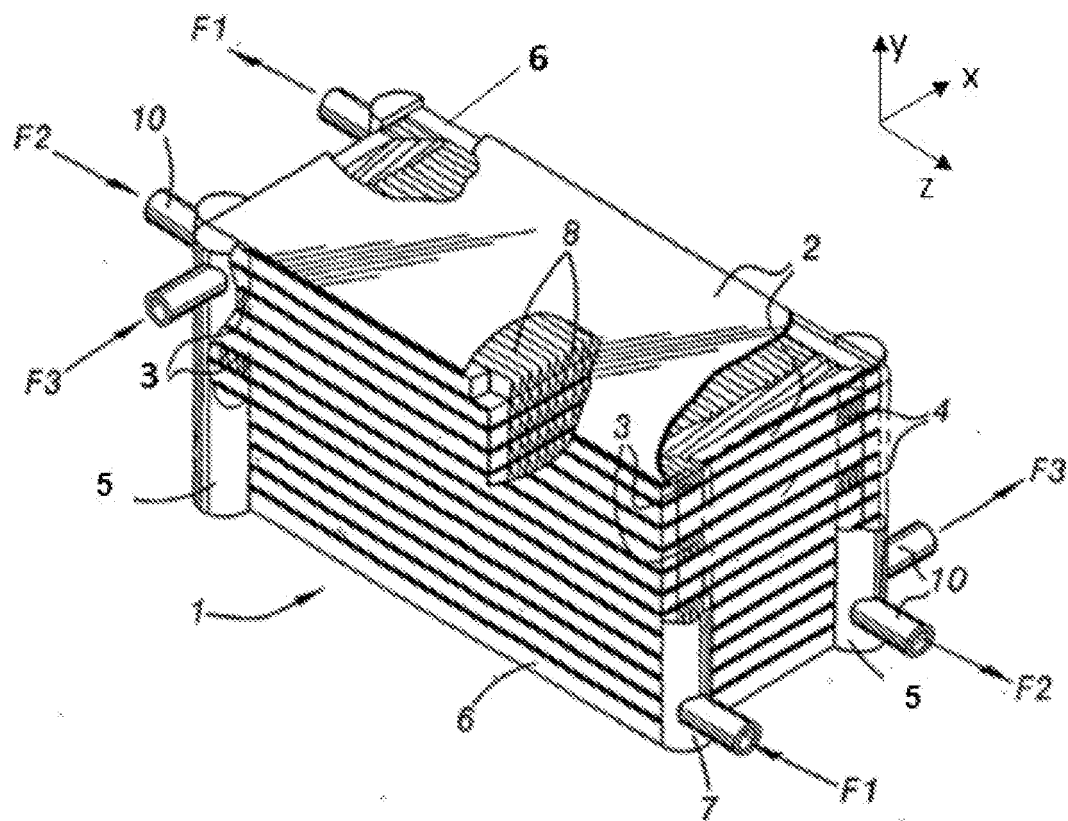
Revendications

- [Revendication 1] Echangeur de chaleur (1) du type à plaques et ailettes brasées comprenant une pluralité de plaques (2) agencées parallèlement entre elles et parallèlement à une direction longitudinale (z) de façon à définir une série de passages pour l'écoulement d'un premier fluide à mettre en relation d'échange thermique avec au moins un deuxième fluide, au moins un passage (3) de l'échangeur de chaleur (1) étant formé entre deux plaques (2) adjacentes et comprenant au moins une première structure ondulée (8) et une deuxième structure ondulée (9) superposées l'une sur l'autre suivant une direction d'empilement (y) qui est orthogonale aux plaques (2), la première structure ondulée (8) et la deuxième structure ondulée (9) comprenant chacune au moins une série de jambes d'onde (83, 93) de forme plane reliées les unes aux autres alternativement par des sommets d'onde (81, 91) et des bases d'onde (82, 92) de forme plane, les jambes d'onde (83, 93) étant reliées aux sommets d'onde et aux bases d'onde respectivement par des arêtes de sommets (84, 94) et des arêtes de bases (85, 95) de forme arrondie, caractérisé en ce que les jambes d'ondes (83) de la première structure ondulée (8) et les jambes d'onde (93) de la deuxième structure ondulée (9) sont agencées en coïncidence les unes au-dessus des autres avec au moins une partie des bases d'onde (82) de la première structure ondulée (8) encastrées chacune entre deux sommets d'ondes (91) successifs du deuxième élément intercalaire (9), de sorte que la première structure ondulée (8) est en contact avec la deuxième structure ondulée (9) au niveau des arêtes de bases (85) de la première structure ondulée (8) et des arêtes de sommets (95) de la deuxième structure ondulée (9).
- [Revendication 2] Echangeur selon la revendication 1, caractérisé en ce que les arêtes de sommets (84, 94) et les arêtes de bases (85, 95) présentent des rayons de courbures externes compris entre 0,5 et 0,9 mm.
- [Revendication 3] Echangeur selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que ledit au moins un passage (3) présente une hauteur totale (H) mesurée suivant la direction d'empilement (y), la première structure ondulée (8) et la deuxième structure ondulée (9) présentant respectivement une première hauteur (h1) et une deuxième hauteur (h2), mesurée suivant la direction d'empilement (y), la somme de la première hauteur (h1) et de la deuxième hauteur (h2) étant supérieure d'au moins 1%, de préférence supérieure de 1 à 10%, à la hauteur totale (H) du passage (3).

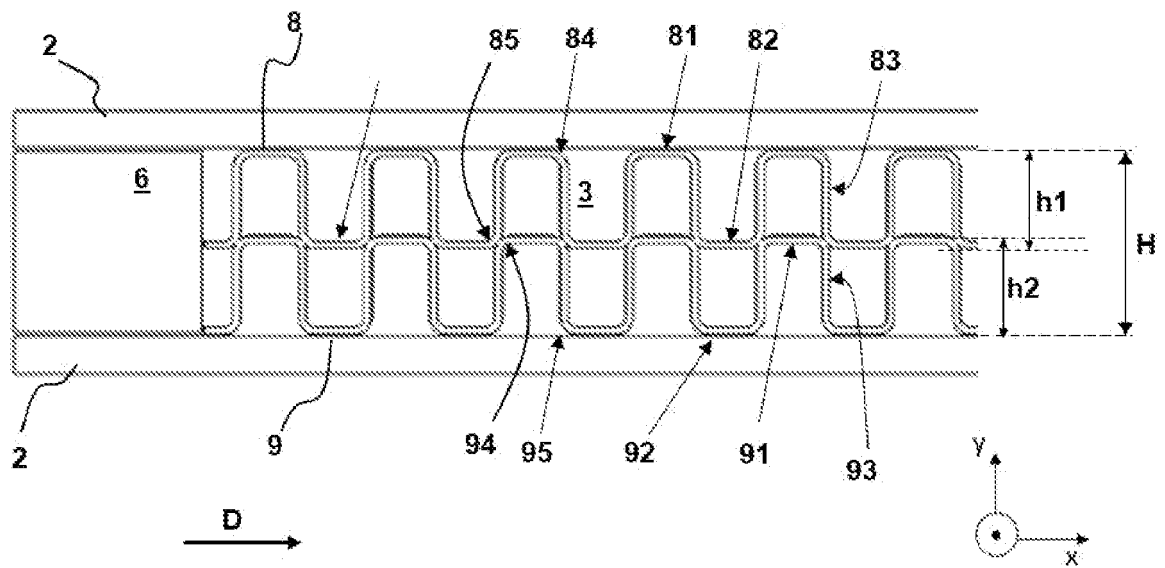
- [Revendication 4] Echangeur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit au moins un passage (3) est formé entre une première plaque (2a) et une deuxième plaque (2b) adjacentes et présente une hauteur totale (H) mesurée suivant la direction d'empilement (y), les bases d'onde (82) de la première structure ondulée (8) ayant des premières faces internes (82a) orientées vers la première plaque (2a) et des premières faces externes (82b) orientées vers la deuxième plaque (2b), les sommets d'onde (91) de la deuxième structure ondulée (9) ayant des deuxièmes faces internes (91a) orientées vers la deuxième plaque (2b) et des deuxièmes faces externes (91b) orientées vers la première plaque (2a), la première structure ondulée (8) et la deuxième structure ondulée (9) étant agencées de sorte que la première face externe (82b) des bases d'onde (82) de la première structure ondulée (8) est agencée à un premier niveau inférieur à un deuxième niveau de la deuxième face externe (91b) des sommets d'onde (91) de la deuxième structure ondulée (9).
- [Revendication 5] Echangeur selon la revendication 4, caractérisé en ce que la distance (e) entre la deuxième face externe (91b) des sommets d'onde (91) de la deuxième structure ondulée (9) et la première face externe (82b) des bases d'onde (82) de la première structure ondulée (8) et la, mesurée parallèlement à la direction d'empilement (y), représente au moins 1%, de préférence entre 1 et 10%, de préférence encore entre 1 et 5%, de la hauteur (H) du passage (3).
- [Revendication 6] Echangeur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la première structure ondulée (8) et la deuxième structure ondulée (9) sont du même type et sont choisies parmi les types ondes droites, ondes à arêtes de hareng, ondes à décalage partiel, ondes à vagues.
- [Revendication 7] Echangeur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les arêtes de bases (85) de la première structure ondulée (8) et les arêtes de sommets (95) de la deuxième structure ondulée (9) sont en contact direct ou via un matériau de brasage.
- [Revendication 8] Echangeur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la première structure ondulée (8) et/ou la deuxième structure ondulée (9) présentent une couche de dépôt poreux ou des microreliefs formés sur au moins une partie de leurs surfaces, en particulier une couche de dépôt poreux ayant une porosité ouverte comprise entre 15 et 60 %, de préférence une porosité ouverte comprise entre 20 et 45 % (% en volume).

- [Revendication 9] Echangeur selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les jambes d'onde (83, 93) se succèdent suivant une direction d'ondulation (D), de préférence la direction d'ondulation (D) est parallèle aux plaques (2) et perpendiculaire à la direction longitudinale (z).
- [Revendication 10] Echangeur selon la revendication 9, caractérisé en ce que ledit au moins un passage (3) est délimité par deux barres de fermeture (6) agencées de part et d'autre des première et deuxième structures ondulées (8, 9) suivant la direction d'ondulation (D), les première et deuxième structures ondulées (8, 9) étant agencées en butée contre lesdites barres de fermeture (6).
- [Revendication 11] Installation de séparation d'air par distillation, caractérisée en ce qu'elle comprend au moins un échangeur de chaleur selon l'une des revendications précédentes et en ce que l'installation comprend des moyens d'alimentation pour distribuer dans des passages de l'échangeur de l'oxygène liquide en tant que premier fluide et de l'azote gazeux en tant que deuxième fluide, ou inversement.

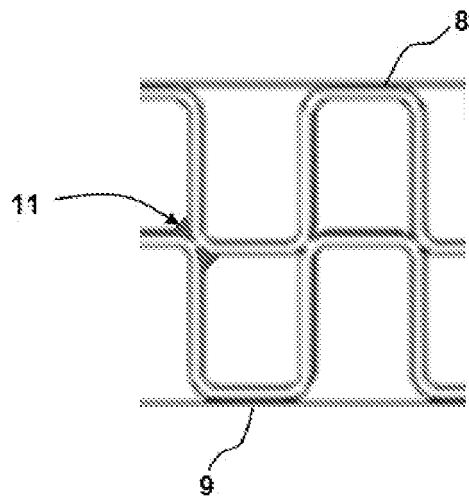
[Fig. 1]



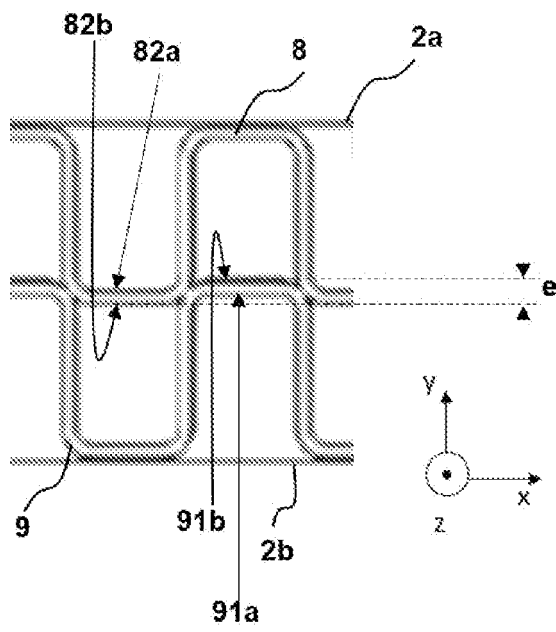
[Fig. 2]



[Fig. 3]



[Fig. 4]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 912283
FR 2209958

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
Y	WO 2006/131685 A2 (AIR LIQUIDE [FR]; CRAYSSAC FREDERIC [FR]; DESCHODT SOPHIE [FR]) 14 décembre 2006 (2006-12-14) * page 5, ligne 32 – page 8, ligne 24; figures 1-4B * -----	1-11	F28F3/02 F28D9/00
Y	US 2 782 009 A (RIPPINGILLE EDWARD V) 19 février 1957 (1957-02-19) * colonne 2, ligne 25 – colonne 3, ligne 43; figures 1, 2, 4, 5, 10 * * colonne 4, lignes 12-37 * -----	1-11	
Y	US 2014/326432 A1 (DEAN JAMES FRANKLIN [CA] ET AL) 6 novembre 2014 (2014-11-06) * alinéas [0053] – [0055], [0081]; figures 5A, 5B, 13 * -----	1-11	
Y	EP 3 276 292 A1 (ZEHNDER GROUP INT AG [CH]; SYMPATEX TECH GMBH [DE]) 31 janvier 2018 (2018-01-31) * alinéas [0089], [0090]; figure 2 * -----	1-11	
Y	US 2 812 165 A (HAMMOND WILLIAM E) 5 novembre 1957 (1957-11-05) * colonne 1, ligne 52 – colonne 3, ligne 36; figures 1-6 * -----	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) F28D F28F
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
13 avril 2023		Axters, Michael	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention 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. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2209958 FA 912283**

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 **13-04-2023**
 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 au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2006131685 A2	14-12-2006	CN	101194137 A	04-06-2008
		CN	101871744 A	27-10-2010
		EP	1899669 A2	19-03-2008
		FR	2887020 A1	15-12-2006
		JP	2008545946 A	18-12-2008
		US	2008210415 A1	04-09-2008
		US	2012090354 A1	19-04-2012
		WO	2006131685 A2	14-12-2006

US 2782009 A	19-02-1957	AUCUN		

US 2014326432 A1	06-11-2014	CN	103998888 A	20-08-2014
		EP	2795225 A1	29-10-2014
		ES	2730850 T3	13-11-2019
		JP	2015509178 A	26-03-2015
		TR	201908563 T4	22-07-2019
		US	2014326432 A1	06-11-2014
		US	2016290664 A1	06-10-2016
		US	2019285289 A1	19-09-2019
WO	2013091099 A1	27-06-2013		

EP 3276292 A1	31-01-2018	AU	2017304249 A1	14-02-2019
		BR	112019001565 A2	14-05-2019
		CA	3032051 A1	01-02-2018
		CN	109690226 A	26-04-2019
		EA	201990147 A1	30-08-2019
		EP	3276292 A1	31-01-2018
		EP	3488171 A1	29-05-2019
		JP	7065073 B2	12-05-2022
		JP	2019528419 A	10-10-2019
		US	2019186846 A1	20-06-2019
		WO	2018020392 A1	01-02-2018

US 2812165 A	05-11-1957	AUCUN		
