



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
02.12.2020 Bulletin 2020/49

(51) Int Cl.:
F28D 7/06 (2006.01) **F28F 1/02** (2006.01)
F28F 1/08 (2006.01) **F28F 1/06** (2006.01)
F28F 13/14 (2006.01) **C10G 9/20** (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **20176929.6**

(22) Date de dépôt: **27.05.2020**

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

(72) Inventeurs:
• **INDURAIN Y URRICELQUI, Bruce**
59800, Lille (FR)
• **LALOT, Sylvain**
59269 Quereinaing (FR)
• **COUV RAT, Mathieu**
27590 Pitres (FR)
• **BEAUBERT, François**
59700 Marcq en Baroeul (FR)
• **UYSTEPRUYST, David**
59300 Valenciennes (FR)

(30) Priorité: **31.05.2019 FR 1905801**

(71) Demandeurs:
• **Manoir Pitres**
75008 Paris (FR)
• **CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**
75794 Paris Cedex 16 (FR)

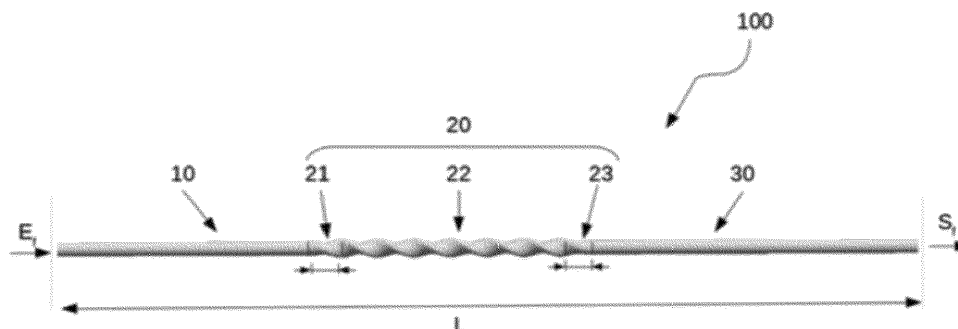
(74) Mandataire: **IP Trust**
2, rue de Clichy
75009 Paris (FR)

(54) **TUBE COMPRENANT AU MOINS UN SEGMENT TORSADÉ A SECTION ELLIPTIQUE OU LOBÉE POUR UN FOUR DE VAPOCRAQUAGE**

(57) L'invention concerne un tube (100) pour un four de vapocraquage comprenant :
- au moins un segment tubulaire aval (30) de section circulaire présentant un diamètre principal,
- au moins un segment tubulaire torsadé (20) présentant une longueur inférieure à un quart de la longueur du tube, et comportant :
- une partie centrale (22) de section elliptique ou lobée, présentant un pas hélicoïdal compris entre une fois et dix fois le diamètre principal, et un rapport d'aspect de

la section elliptique ou lobée compris entre 0,5 et 0,8,
- une partie de transition amont (21) établissant une transition géométrique entre la partie centrale (22) et un segment tubulaire de section circulaire,
- une partie de transition aval (23) établissant une transition géométrique entre la partie centrale (22) et le segment tubulaire aval (30),
un fluide étant destiné à s'écouler de la partie de transition amont (21) vers la partie de transition aval (23) .

[Fig. 2a]



Description**DOMAINE DE L'INVENTION**

- 5 **[0001]** La présente invention concerne le domaine des tubes pour fours de vapocraquage. Elle concerne en particulier un tube comprenant un segment torsadé à section elliptique ou lobée.

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

- 10 **[0002]** L'amélioration des performances d'échanges thermiques dans les tubes de fours de vapocraquage est une préoccupation majeure. Les fours de vapocraquage sont en général constitués d'un assemblage de tubes reliés entre eux par des coudes comme illustré sur la figure 1. Le design de cet assemblage de tubes peut bien-sûr varier selon différents critères, celui de la figure 1 n'étant présenté qu'à titre d'exemple. Le fluide (par exemple, éthane, naphta, etc.) et de la vapeur d'eau circulent dans cet assemblage de tubes et sont portés à hautes températures afin de déclencher une réaction de vapocraquage. Pour une température de la paroi intérieure des tubes donnée, plus les échanges thermiques entre ladite paroi et le fluide sont importants et plus le rendement de la réaction est élevé.

- 15 **[0003]** Cependant, des réactions parasites sont à l'origine du dépôt d'une couche de coke sur la paroi intérieure de l'assemblage de tubes. L'épaisseur de cette couche augmente au cours du temps, ce qui encrasse les tubes, diminue les transferts thermiques entre la paroi de l'assemblage de tubes et le fluide en écoulement et augmente les pertes de charge.

- 20 **[0004]** La cinétique de formation du coke dépend en partie de la température de la paroi intérieure des tubes. Il y a donc intérêt à limiter la température d'utilisation (pour limiter le cokage), mais en parallèle d'augmenter les performances d'échange thermique entre tubes et fluide pour obtenir un rendement important de la réaction de vapocraquage.

- 25 **[0005]** Des solutions mettant en œuvre un écoulement tourbillonnant (« swirling flow » selon la terminologie anglo-saxonne) ont ainsi été proposées car un tel écoulement présente l'avantage d'améliorer les échanges thermiques entre le fluide et les parois intérieures de l'assemblage de tubes. En effet, un écoulement tourbillonnant perturbe la couche limite dynamique et thermique qui s'établit classiquement le long de parois lisses cylindriques et qui affecte négativement l'échange de chaleur. Par ailleurs, l'augmentation des contraintes pariétales liées à un écoulement tourbillonnant peuvent être favorables au décollement de la couche de coke. Notons néanmoins qu'un écoulement tourbillonnant est à l'origine d'une augmentation des pertes de charge par rapport à un écoulement non tourbillonnant (une plus forte pression d'entrée du fluide est requise), ce qui est défavorable au rendement de la réaction de vapocraquage. L'amélioration des transferts thermiques entre la paroi du tube et le fluide combiné au brassage de ce dernier par l'écoulement tourbillonnant permet également d'obtenir une plus grande homogénéisation des températures au sein d'une section de passage du tube. En d'autres termes, avec un écoulement tourbillonnant non seulement la température moyenne du fluide est plus proche de celle de la paroi du tube mais l'écart type de la répartition des températures dans une section de passage est également plus faible. L'amélioration de l'homogénéisation des températures est favorable à la sélectivité de certaines espèces chimiques à haute valeur ajoutée dans la réaction de vapocraquage et est par conséquent un paramètre important.

- 30 **[0006]** Le document EP1561795 propose un assemblage de tubes dont la paroi intérieure comporte des ailettes agencées de manière discrète sur une trajectoire hélicoïdale. Le document US2005/0131263 propose une technologie de tubes présentant des ailettes internes suivant une trajectoire hélicoïdale. Ces deux approches procurent un niveau performant d'échanges thermiques entre le fluide et l'assemblage de tubes, mais au prix de grandes pertes de charge, accrues par l'augmentation des surfaces de contact entre le tube et le fluide.

- 35 **[0007]** Le document US7749462 divulgue un assemblage de tubes de section circulaire dont l'axe suit un chemin hélicoïdal de faible amplitude. Cette solution favorable aux échanges thermiques présente l'inconvénient d'un encombrement plus élevé qu'un tube classique et reste complexe en termes de fabrication.

- 40 **[0008]** Le document US6530422 propose d'insérer dans l'assemblage de tubes une pale torsadée sur une longueur donnée dudit assemblage. Cela permet de limiter les pertes de charge, mais les performances d'amélioration d'échange thermique restent limitées ; de plus, cette pale engendre de fortes contraintes mécaniques sur le tube dues à la dilatation thermique et mène à l'endommagement en service.

OBJET DE L'INVENTION

- 45 **[0009]** La présente invention propose une solution alternative aux solutions de l'état de la technique. L'invention concerne un tube de section circulaire, comprenant au moins un segment tubulaire torsadé à section elliptique ou lobée, lequel segment présente un rapport d'aspect et un pas hélicoïdal définis. Des parties extrémales de transition géométrique entre des segments de tube circulaire et le segment torsadé sont présentes, de manière à favoriser les échanges thermiques tout en limitant les pertes de charges.

BREVE DESCRIPTION DE L'INVENTION

[0010] L'invention concerne un tube pour un four de vapocraquage comprenant :

- 5 - au moins un segment tubulaire aval de section circulaire présentant un diamètre principal,
- au moins un segment tubulaire torsadé présentant une longueur inférieure à un quart de la longueur du tube, et comportant :
 - une partie centrale de section elliptique ou lobée, présentant un pas hélicoïdal compris entre une fois et dix fois le diamètre principal, et un rapport d'aspect de la section elliptique ou lobée compris entre 0,5 et 0,8,
- 10 - une partie de transition amont établissant une transition géométrique entre la partie centrale et un segment tubulaire de section circulaire,
- une partie de transition aval établissant une transition géométrique entre la partie centrale et le segment tubulaire aval.

[0011] Un fluide est destiné à s'écouler dans le tube, dans la direction allant de la partie de transition amont vers la partie de transition aval.

[0012] Selon d'autres caractéristiques avantageuses et non limitatives de l'invention, prises seules ou selon toutes combinaisons techniquement réalisables :

- 20 • le pas hélicoïdal de la partie centrale du segment tubulaire torsadé est compris entre cinq fois et dix fois le diamètre principal ;
- le pas hélicoïdal de la partie centrale du segment tubulaire torsadé est fixe ;
- le pas hélicoïdal de la partie centrale du segment tubulaire torsadé est variable entre la partie de transition amont et la partie de transition aval ;
- le pas hélicoïdal évolue linéairement et continûment entre la partie de transition amont et la partie de transition aval ;
- 25 • le rapport d'aspect de la section elliptique ou lobée est compris entre 0,6 et 0,7 ;
- les parties de transition amont et/ou aval présentent une longueur comprise entre la valeur du pas hélicoïdal et le quart de la valeur dudit pas ;
- la partie de transition amont et/ou la partie de transition aval établit(ssent) une transition en rotation respectivement entre la partie centrale et un segment tubulaire de section circulaire, et entre la partie centrale et le segment tubulaire aval ;
- 30 • la partie de transition amont et/ou la partie de transition aval établit(ssent) une transition linéaire en rotation respectivement entre la partie centrale et un segment tubulaire de section circulaire, et entre la partie centrale et le segment tubulaire aval ;
- le segment tubulaire torsadé présente une longueur comprise entre cinq fois le diamètre principal et vingt fois le diamètre principal ;
- 35 • le tube comprend au moins un segment tubulaire amont, de section circulaire présentant le diamètre principal, relié à la partie de transition amont du segment tubulaire torsadé ;
- un segment tubulaire torsadé est présent pour chaque tronçon du tube présentant une longueur de l'ordre de cent fois le diamètre principal ;
- 40 • le tube présente un coude au niveau duquel au moins un segment tubulaire torsadé est présent ;
- un segment tubulaire torsadé est disposé à chaque extrémité du coude ;
- l'aire de la section du segment tubulaire torsadé est sensiblement égale à l'aire de la section circulaire du segment tubulaire aval.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0013] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description détaillée de l'invention qui va suivre en référence aux figures annexées sur lesquelles :

50 [Fig. 1] La figure 1 présente un exemple d'assemblage de tubes pour un four de vapocraquage selon l'état de la technique.

[Fig. 2a]

[Fig. 2b]

55 [Fig. 2c] Les figures 2a, 2b et 2c présentent des exemples de tubes conformes à l'invention, en vue 3D (figure 2a) ou en vues schématiques (figures 2b, 2c).

[Fig. 3] La figure 3 présente une illustration de l'évolution en rotation de la section d'un segment tubulaire torsadé,

compris dans un tube conforme à l'invention.

[Fig. 4] La figure 4 présente différents exemples de sections elliptique et lobées pour un segment tubulaire torsadé, compris dans un tube conforme à l'invention.

[Fig. 5] La figure 5 présente un exemple d'un tube de section à trois lobes dont le pas hélicoïdal de la partie centrale est variable, avec des parties de transition amont et aval linéaires en rotation.

[0014] [Tab. 1] Le tableau 1 présente des résultats de simulations pour des exemples de tubes conformes à la présente invention, relatifs à l'amélioration des transferts thermiques et de l'homogénéisation des températures, et à l'augmentation des pertes de charge par rapport à un tube de référence, ainsi qu'à l'intensité de l'écoulement tourbillonnant.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0015] Dans la partie descriptive, les mêmes références sur les figures pourront être utilisées pour des éléments de même type. Les figures sont des représentations schématiques qui, dans un objectif de lisibilité, ne sont pas nécessairement à l'échelle.

[0016] La présente invention concerne un tube 100 pour un four de vapocraquage. Un tel tube 100 peut présenter différents designs, notamment incluant des tronçons rectilignes et des tronçons courbés, de manière à relier une entrée de fluide E_f à une sortie de fluide S_f . Le tube 100 présente une longueur totale L , typiquement entre l'entrée de fluide E_f et la sortie de fluide S_f . Notons qu'une pluralité de tubes 100 pourra être utilisée pour former un assemblage de tubes 200 dont un exemple de design est illustré en figure 1. Un tube 100 selon l'invention est avantageusement formé dans un acier résistant à hautes températures et son épaisseur est comprise entre 5 et 15mm.

[0017] Le tube 100 selon l'invention comprend au moins un segment tubulaire aval 30, de section circulaire présentant un diamètre principal D interne (figures 2a, 2b).

[0018] Avantageusement, le tube 100 comprend également au moins un segment tubulaire amont 10, de section circulaire présentant le même diamètre principal D interne que le segment tubulaire aval 30. Les terminologies « amont » et « aval » sont utilisées ici pour traduire le sens d'écoulement du fluide dans le tube 100 : ledit fluide est destiné à s'écouler depuis le (au moins un) segment amont 10 vers le (au moins un) segment aval 30. A titre d'exemple, le diamètre principal D interne pourra être compris entre 40 et 200mm.

[0019] Notons qu'au niveau de l'entrée du fluide E_f , le tube 100 pourrait ne pas comprendre de segment tubulaire amont 10 tel que représenté sur les figures 2a et 2b, mais avoir le segment tubulaire torsadé 20 (le plus proche de l'entrée E_f) directement raccordé à un segment tubulaire de section circulaire, externe au tube 100, aménagé dans le four de vapocraquage pour l'arrivée du fluide.

[0020] Le tube 100 comprend en outre au moins un segment tubulaire torsadé 20, situé avant le segment tubulaire aval 30 du tube 100 et après le segment tubulaire amont 10 lorsqu'il est présent (figure 2a). Par segment tubulaire torsadé, on entend un segment qui partage le même axe central que les segments tubulaires amont 10 et aval 30 du tube 100, mais dont la section non circulaire évolue le long du segment selon une rotation. Dans l'exemple de la figure 3, le segment tubulaire torsadé 20 présente une section elliptique.

[0021] Le segment tubulaire torsadé 20 comprend en particulier une partie centrale 22 présentant une section elliptique ou lobée, dont des exemples sont présentés en figure 4. Quelle que soit la section elliptique ou lobée, le pas hélicoïdal P est défini comme la distance nécessaire pour qu'une section initiale (à une extrémité de la partie centrale 22) effectue une rotation de 360° (figure 3). Le pas hélicoïdal P de la partie centrale 22 traduit donc la torsion qui a été introduite dans le segment tubulaire torsadé 20, au niveau de ladite partie centrale 22 : une forte intensité de torsion correspond à un pas hélicoïdal petit, une faible intensité de torsion correspond à un grand pas hélicoïdal. Selon la présente invention, le pas hélicoïdal P de la partie centrale 22 du segment tubulaire torsadé 20 est compris entre une fois et dix fois le diamètre principal D de la section circulaire du tube 100 : $1D < P < 10D$. Notons que le pas hélicoïdal P peut être fixe ou variable sur l'étendue de la partie centrale 22 du segment tubulaire torsadé 20. Lorsqu'il est fixe, le pas hélicoïdal P est préférentiellement compris entre cinq fois et dix fois le diamètre principal D de la section circulaire du tube 100 : $5D < P < 10D$.

Alternativement, le pas hélicoïdal P de la partie centrale 22 du segment tubulaire torsadé 20 peut être variable de l'amont vers l'aval. En particulier, le pas hélicoïdal P peut évoluer linéairement et continûment, de manière décroissante préférentiellement, dans le sens d'une augmentation de l'intensité de torsion de l'amont vers l'aval, comme par exemple illustré sur la figure 5. Un tel pas hélicoïdal évolutif est particulièrement intéressant dans le cas de sections lobées car il améliore les échanges thermiques et permet une grande homogénéisation de la répartition des températures au sein de la section de passage du fluide dans la section tubulaire torsadée 20.

[0022] La partie centrale 22 est également caractérisée par le rapport d'aspect, noté RA , de la section elliptique ou lobée. Le rapport d'aspect RA est défini comme le rapport entre :

- le diamètre « a » du cercle A inscrit dans la section elliptique ou lobée et passant par au moins deux points de ladite section ; en particulier, le cercle A passe par deux points de la section elliptique (figure 4 (a)), par trois points de la section à trois lobes (figure 4 (b)), par quatre points de la section à quatre lobes (figure 4 (c)), et plus généralement par n points d'une section à n lobes ;
- et le diamètre « b » du cercle B dans lequel est circonscrite la section elliptique ou lobée et passant par au moins deux points de ladite section.

[0023] Le diamètre a est appelé « petit diamètre a », et le diamètre b est appelé « grand diamètre b ». Le rapport d'aspect RA est donc le rapport entre le petit diamètre a et le grand diamètre b : $RA = a / b$, et est compris entre 0,5 et 0,8, préférentiellement entre 0,6 et 0,7.

[0024] Avantageusement, dans le cas d'une section lobée, le nombre de lobes est compris entre 3 et 6, car ce nombre de lobes permet d'avoir un bon compromis entre amélioration des transferts thermiques et augmentation des pertes de charge. Préférentiellement, le nombre de lobes sera de 3 ou 4. En plus du rapport d'aspect RA, les sections lobées sont caractérisées par une courbure inter-lobes comme présenté sur les figures 4b et 4c. Cette courbure possède deux paramètres dont le premier est l'angle θ entre les deux extrémités de la courbure et varie entre 0 et 20° ; préférentiellement l'angle θ est de 10°. Le second paramètre est la profondeur de la courbure et est déterminé par le cercle intermédiaire C qui passe par les points situés aux extrémités de la courbure ; le rayon du cercle intermédiaire C est plus grand que le rayon du cercle inscrit A, de 5 à 10%.

[0025] De manière avantageuse, l'aire de la section elliptique ou lobée de la partie centrale 22 du segment tubulaire torsadé 20 est sensiblement égale à l'aire de la section circulaire du segment tubulaire aval 30 et amont 10 (s'il est présent) . Par sensiblement égal, on entend égal à plus ou moins 15%. La conservation de l'aire des sections du tube permet de limiter l'augmentation des pertes de charge.

[0026] Le segment tubulaire torsadé 20 comprend également une partie de transition amont 21 et une partie de transition aval 23. La partie de transition amont 21 établit une transition géométrique entre la partie centrale 22 et un segment tubulaire de section circulaire (qui peut être un segment tubulaire amont 10 lorsqu'il est présent, ou par exemple une extrémité tubulaire de raccordement pour l'arrivée du fluide, externe au tube 100). La partie de transition aval 23 établit quant à elle une transition géométrique entre la partie centrale 22 et le segment tubulaire aval 30.

[0027] De manière avantageuse, la partie de transition amont 21 et/ou la partie de transition aval 23 établit(ssent) une transition en rotation entre la partie centrale 22 et respectivement les segments de section circulaire en amont et en aval du segment torsadé 20.

[0028] Par transition en rotation on entend une transition géométrique, reliant la section elliptique ou lobée de la partie centrale 22 à la section circulaire des segments en amont ou aval, conjuguée à une torsion d'intensité similaire à celle de la partie centrale 22 ou d'intensité décroissante depuis la partie centrale 22 jusqu'aux segments de section circulaire. En d'autres termes, les parties de transition 21,23 voient évoluer la section elliptique ou lobée (de la partie centrale 22) progressivement vers une section circulaire de diamètre principal D tout en subissant une rotation. Cette évolution de la section elliptique ou lobée vers une section circulaire peut être linéaire ou pas.

[0029] Le segment tubulaire torsadé 20 du tube 100 selon l'invention permet de développer un écoulement tourbillonnant du fluide localement dans le tube 100, et ainsi de favoriser les échanges thermiques et de limiter le cokage. L'intensité de rotation de l'écoulement tourbillonnant généré au niveau du segment tubulaire torsadé 20, décroît ensuite dans le segment tubulaire aval 30. Dans un assemblage 200 de tubes de grande longueur, plusieurs segments tubulaires torsadés 20 pourront être disposés le long dudit assemblage de manière à maintenir un écoulement tourbillonnant, d'intensité forte puis décroissante, sur toute sa longueur, comme par exemple illustré sur la figure 2b.

[0030] La génération locale d'un écoulement tourbillonnant d'intensité forte, puis décroissante présente également l'avantage de limiter significativement les pertes de charge.

[0031] De plus, lorsqu'une partie de transition amont 21 avec rotation est mise en œuvre, cela permet d'établir progressivement la rotation du fluide, faisant passer ce dernier d'un écoulement principalement axial en amont à un écoulement tourbillonnant dans la partie centrale 22 du segment tubulaire torsadé 20.

[0032] Lorsqu'une partie de transition aval 23 avec rotation est mise en œuvre, elle permet d'accompagner la rotation du fluide et de faire perdurer l'écoulement tourbillonnant plus longtemps dans le segment tubulaire aval 30.

[0033] Ces transitions particulières évitent des changements brutaux de sections du tube 100 et participent efficacement à réduire les pertes de charges.

[0034] Préférentiellement, le segment tubulaire torsadé 20 est de longueur limitée par rapport à la longueur totale du tube 100. Typiquement, il peut présenter une longueur comprise entre cinq fois et vingt fois le diamètre principal D. Le segment tubulaire torsadé 20 présente en général une longueur inférieure à un quart de la longueur du tube 100. Avantageusement, sa longueur est inférieure à un quart de la somme des longueurs du segment tubulaire amont 10 et du segment tubulaire aval 30.

[0035] Par exemple, un segment tubulaire torsadé 20 pourra être inséré pour chaque tronçon de tube 100 présentant une longueur de l'ordre de cent fois le diamètre principal D, et pourra représenter environ un cinquième de ladite longueur.

[0036] Selon un autre exemple, pour un tube 100 ou un assemblage de tubes 200 présentant une longueur totale de cinq cent fois le diamètre principal D , on préconisera l'insertion de cinq segments tubulaires torsadés 20, distribués sur la longueur totale.

[0037] Comme le segment tubulaire torsadé 20 présente une longueur limitée par rapport à la longueur totale du tube 100 ou de l'assemblage de tubes 200, il peut être avantageux d'opérer sa fabrication puis de l'assembler par soudure aux différents segments tubulaires de section circulaire constituant le tube 100. Alternativement, un tube droit pourrait être déformé localement pour obtenir une section elliptique ou lobée en rotation formant le segment tubulaire torsadé 20, entre des segments tubulaires amont 10 (si présent) et aval 30 de section circulaire.

[0038] De manière avantageuse, les parties de transition amont 21 et aval 23 présentent une longueur L_{tr} comprise entre la valeur du pas hélicoïdal P et le quart de la valeur dudit pas P . Préférentiellement, la longueur des parties de transition amont 21 et aval 23 est définie à la valeur d'un demi pas hélicoïdal P . Dans le cas d'un pas hélicoïdal variable, la longueur L_{tr} est avantageusement comprise entre la valeur maximale du pas hélicoïdal et le quart de ladite valeur maximale.

[0039] Selon un premier mode de réalisation, le tube 100 comprend une pluralité de tronçons rectilignes raccordés par un ou plusieurs coude(s) (deux tronçons raccordés par un coude dans l'exemple illustré sur la figure 2b) : un segment tubulaire torsadé 20 est inséré dans au moins un des tronçons rectilignes, plus avantageusement dans chacun des tronçons.

[0040] Selon un deuxième mode de réalisation, le tube 100 comprend également une pluralité de tronçons rectilignes raccordés par au moins un coude et au moins un segment tubulaire torsadé 20 est inséré au niveau du coude. Dans l'exemple de la figure 2c, un segment tubulaire torsadé 20 est disposé à chaque extrémité du coude. Un premier segment aval 30 (à gauche par rapport à l'axe de symétrie du coude) et un deuxième segment amont 10 (à droite par rapport à l'axe de symétrie du coude) forment une portion de coude. Deux segments tubulaires torsadés 20, l'un disposé entre le premier segment amont 10 et le premier segment aval 30 (à gauche par rapport à l'axe de symétrie du coude) et l'autre disposé entre le deuxième segment amont 10 et le deuxième segment aval 30 (à droite par rapport à l'axe de symétrie du coude), forment une portion complémentaire de coude.

[0041] Alternativement, un seul segment tubulaire torsadé 20, centré sur l'axe de symétrie du coude, et s'étendant sur tout ou partie du coude pourrait être mis en œuvre.

[0042] Ce mode de réalisation est avantageux en ce qu'il permet au minimum de mutualiser les contributions du coude et du segment torsadé 20 aux pertes de charge. Il est en outre susceptible de diminuer les pertes de charge occasionnées par le coude lui-même.

[0043] Le premier et le deuxième mode de réalisation peuvent bien-sûr être combinés, en insérant des segments tubulaires torsadés 20 dans les tronçons rectilignes et/ou les coudes d'un tube 100 ou d'un assemblage de tubes 200.

Exemples de résultats de simulation :

[0044] Les simulations numériques d'écoulements ont été obtenues à partir du logiciel Open-source OpenFOAM. Les géométries numériques des tubes 100 ont été obtenues à partir du logiciel de CAD (Computer Assisted Design) open-source FreeCAD.

[0045] Les propriétés thermodynamiques du fluide sont celles de l'air dans les conditions normales de température et de pression. Les paramètres de l'écoulement ainsi que les conditions aux limites adoptées sont les mêmes que ceux décrits dans les travaux de Tang et al. (« Experimental and numerical investigation of convective heat transfer and fluid flow in twisted spiral tube », International Journal of Heat and Mass Transfer, 90 (2015), 523-541). La modélisation de la turbulence est quant à elle un peu différente car une approche Bas-Reynolds avec un modèle de turbulence $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) a été privilégié pour résoudre les différentes équations de l'écoulement et celles de la couche limite. Il est à noter que l'étude de l'écoulement tourbillonnant ne se limite pas à la zone intérieure du segment tubulaire torsadé 20 mais s'étend également au segment tubulaire aval 30 de section circulaire afin de prendre en compte la décroissance de l'intensité de rotation de l'écoulement.

[0046] Différents tubes 100, comprenant un segment tubulaire torsadé 20 entre des segments amont 10 et aval 30 de section circulaire, ont été évalués par rapport à un tube de référence (« Ref » dans le tableau 1) de section totalement circulaire : l'évaluation concerne l'amélioration des transferts thermiques, l'amélioration de l'homogénéisation des températures et l'augmentation des pertes de charge par rapport au tube de référence, ainsi que l'intensité de rotation de l'écoulement tourbillonnant. Notons que les résultats à suivre sont donnés pour un nombre de Reynolds de 10 000.

[0047] Le tableau 1 reprend les différents tubes testés de longueur totale $100D$ (D étant le diamètre interne de la section circulaire des segments amont 10 et aval 30, dit diamètre principal) et les performances attendues pour chacun d'eux.

[Tab. 1]

#	Caractéristiques du tube (Longueur totale 100D)		Amélioration des transferts thermiques / Ref	Augmentation des pertes de charge / Ref	Intensité de l'écoulement tourbillonnant	Amélioration de l'homogénéisation des températures / Réf
Ref		Section totalement circulaire	-	-	0%	-
1	Segment torsadé de longueur avec partie centrale de section elliptique; parties de transition amont et aval géométriques	RA = 0,6	13%	33%	8%	4,10%
		P = 10D				
2		RA = 0,6	22%	63%	14%	12,10%
		P = 5D				
3		RA = 0,7	17%	44%	9%	6,80%
		P = 5D				
4		RA = 0,6	26%	40,3%	11%	9,60%
		P = 5D				
5	Segment torsadé de longueur avec partie centrale de section elliptique et avec parties de transition amont et linéaire en rotation	$L_r = P$				
		RA = 0,6	33%	46,5%	12%	7,00%
		P = 5D				
		$L_r = P/2$				
6		RA = 0,6	31%	48,5%	12%	5,80%
		P = 5D				
		$L_r = P/4$				
7		RA = 0,6	30%	123%	22%	11,40%
	Segment torsadé de longueur 20D avec partie centrale à trois lobes et parties de transition amont et aval linéaire en rotation	P = 5D				
		$L_r = P/2$				

(suite)

#	Caractéristiques du tube (Longueur totale 100D)			Amélioration des transferts thermiques / Ref	Augmentation des pertes de charge / Ref	Intensité de l'écoulement tourbillonnant	Amélioration de l'homogénéisation des températures / Réf
8	Segment torsadé de longueur 10D avec partie centrale de section à trois lobes et parties de transition amont et linéaire en rotation	RA = 0,6	25%	41%	22%	3,50%	
		P = 5D					
		L _r = P/2					
9		RA = 0,5	28%	49%	32%	7,80%	
		P = 5D					
		L _r = P/2					
10		RA = 0,6	35%	79%	22%	10,60%	
		P=2D					
		L _r = P/2					
11	Segment torsadé avec un pas hélicoïdal variable de longueur 10D avec partie centrale de section à trois lobes et parties de transition amont et aval linéaire en rotation	RA = 0,6	33%	59%	22%	7,80%	
		P = 5D --> 1D					
		L _r = 5D/2					

[0048] Rappelons que le but recherché est d'améliorer à la fois les transferts thermiques et l'homogénéisation des températures, de limiter au mieux l'augmentation des pertes de charge par rapport au tube de référence, et d'obtenir une intensité de rotation de l'écoulement tourbillonnant aussi grande que possible et en particulier aussi proche que possible de 10%, voire supérieure.

[0049] Les tubes référencés #1, #2 et #3 selon l'invention, comprennent un segment torsadé 20 de longueur 20D, avec une partie centrale 22 de section elliptique et des parties de transition amont 21 et aval 23 établissant une transition géométrique respectivement avec les segments tubulaires amont 10 et aval 30. Les pas hélicoïdaux et les rapports d'aspect des tubes #1, #2 et #3 sont indiqués dans le tableau 1.

[0050] Ces trois exemples de tubes permettent d'améliorer les transferts thermiques entre 13% et 22% et l'homogénéisation des températures dans les sections de passage du tube de 4,1% à 12,1% par rapport à un tube classique de section totalement circulaire. Un pas hélicoïdal P plus petit (pour un même rapport d'aspect RA) favorise l'augmentation des transferts thermiques, l'homogénéisation des températures et l'intensité de l'écoulement tourbillonnant (tube #2 versus tube #1) ; en parallèle, cela augmente aussi significativement les pertes de charge. En augmentant le rapport d'aspect RA, on arrive à limiter l'augmentation des pertes de charges, tout en conservant un niveau correct d'amélioration des transferts thermiques et d'homogénéisation des températures, et une intensité de l'écoulement tourbillonnant proche de 10% (tube #3 versus tube #2) .

[0051] Les tubes #4, #5, #6, selon des modes préférés de l'invention, comprennent un segment torsadé 20 de longueur 20D, avec une partie centrale 22 de section elliptique et des parties de transition amont 21 et aval 23 établissant une transition linéaire en rotation respectivement avec les segments tubulaires amont 10 et aval 30. Les pas hélicoïdaux, les rapports d'aspect et les longueurs des parties de transition (amont 21 et aval 23 identiques) des tubes #4, #5 et #6 sont indiqués dans le tableau 1.

[0052] L'utilisation de parties de transition amont 21 et aval 23 en rotation a un effet très bénéfique à la fois sur les transferts thermiques qui affichent une augmentation plus importante et sur les pertes de charge dont l'augmentation est plus limitée que dans le cas d'une transition uniquement géométrique (tubes #4,5,6 vs tube #2). L'intensité de l'écoulement tourbillonnant entre 11% et 12% est également améliorée.

[0053] Le segment torsadé 20 muni de parties de transition amont 21 et aval 23 est donc particulièrement favorable à l'obtention de bonnes performances énergétiques.

[0054] Le tube #7, selon l'invention, comprend un segment torsadé 20 de longueur 20D, avec une partie centrale 22 de section à trois lobes et des parties de transition amont 21 et aval 23 établissant une transition linéaire en rotation respectivement avec les segments tubulaires amont 10 et aval 30. Le pas hélicoïdal, le rapport d'aspect et les longueurs des parties de transition (amont 21 et aval 23 identiques) du tube #7 sont indiqués dans le tableau 1.

[0055] L'adoption d'une section de passage à trois lobes permet une nette augmentation de l'intensité de l'écoulement tourbillonnant et est accompagnée d'une plus grande homogénéisation des températures dans le tube (tube #5 vs tube #7). Toutefois, ces améliorations se font au prix d'une augmentation importante des pertes de charge.

[0056] Les tubes #8, #9, #10, selon des modes préférés de l'invention, comprennent un segment torsadé 20 de longueur 10D, avec une partie centrale 22 de section à trois lobes et des parties de transition amont 21 et aval 23 établissant une transition linéaire en rotation respectivement avec les segments tubulaires amont 10 et aval 30. Les pas hélicoïdaux, les rapports d'aspect et les longueurs des parties de transition (amont 21 et aval 23 identiques) des tubes #8, #9 et #10 sont indiqués dans le tableau 1.

[0057] La réduction de la longueur du segment torsadé dont la section possède trois lobes permet de réduire significativement les pertes de charge en passant de 123% à 41% d'augmentation (tube #7 vs tube #8), et cela sans impacter significativement l'amélioration des transferts thermiques. D'autre part, la réduction de la longueur du dispositif permet également de réaliser une économie de matériel.

[0058] La réduction du rapport d'aspect permet une nette augmentation l'intensité de l'écoulement tourbillonnant qui engendre une grande amélioration de l'homogénéisation des températures pour une augmentation des pertes de charge qui reste modérée (tube #8 vs tube #9).

[0059] L'augmentation de la torsion du pas hélicoïdal de $P=5D$ à $P=2D$ (tube #8 vs tube #10) permet d'obtenir à la fois une plus grande amélioration des transferts thermiques et une meilleure homogénéisation des températures. Néanmoins, cela se fait au prix d'une augmentation relativement importante des pertes de charge.

[0060] Le tube #11, selon un mode préféré de l'invention, comprend un segment torsadé 20 de longueur 10D, avec une partie centrale 22 de section à trois lobes et dont le pas hélicoïdal varie linéairement et continûment de 5D à 1D. Ce tube possède également des parties de transition amont 21 et aval 23 établissant une transition linéaire en rotation respectivement avec les segments tubulaires amont 10 et aval 30. Le rapport d'aspect et la longueur des parties de transition (amont 21 et aval 23 identiques) du tube #11 sont indiqués dans le tableau 1.

[0061] L'adoption du pas hélicoïdal variable permet une grande augmentation de l'amélioration des transferts thermiques ainsi que de l'homogénéisation des températures (tube #11 vs tubes #8) sans subir le même contre coût sur les pertes de charge qu'avec un pas hélicoïdal serré et constant (tube #11 vs tube #10).

[0062] Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux modes de mise en œuvre et exemples décrits, et on peut y

apporter des variantes de réalisation sans sortir du cadre de l'invention tel que défini par les revendications.

Revendications

1. Tube (100) pour un four de vapocraquage comprenant :

- au moins un segment tubulaire aval (30) de section circulaire présentant un diamètre principal (D),
- au moins un segment tubulaire torsadé (20) présentant une longueur inférieure à un quart de la longueur du tube (100), et comportant :

- une partie centrale (22) de section elliptique ou lobée, présentant un pas hélicoïdal (P) compris entre une fois et dix fois le diamètre principal (D), et un rapport d'aspect (RA) de la section elliptique ou lobée compris entre 0,5 et 0,8,
- une partie de transition amont (21) établissant une transition géométrique entre la partie centrale (22) et un segment tubulaire de section circulaire,
- une partie de transition aval (23) établissant une transition géométrique entre la partie centrale (22) et le segment tubulaire aval (30),

un fluide étant destiné à s'écouler de la partie de transition amont (21) vers la partie de transition aval (23) .

2. Tube (100) pour un four de vapocraquage selon la revendication précédente, dans lequel le pas hélicoïdal (P) de la partie centrale (22) du segment tubulaire torsadé (20) est fixe, et est compris entre cinq fois et dix fois le diamètre principal (D).

3. Tube (100) pour un four de vapocraquage selon la revendication 1, dans lequel le pas hélicoïdal (P) de la partie centrale (22) du segment tubulaire torsadé (20) est variable entre la partie de transition amont (21) et la partie de transition aval (23).

4. Tube (100) pour un four de vapocraquage selon la revendication précédente, dans lequel le pas hélicoïdal (P) évolue linéairement et continûment entre la partie de transition amont (21) et la partie de transition aval (23).

5. Tube (100) pour un four de vapocraquage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le rapport d'aspect (RA) de la section elliptique ou lobée est compris entre 0,6 et 0,7.

6. Tube (100) pour un four de vapocraquage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les parties de transition amont (21) et/ou aval (23) présentent une longueur comprise entre la valeur du pas hélicoïdal (P) et le quart de la valeur dudit pas (P).

7. Tube (100) pour un four de vapocraquage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la partie de transition amont (21) et/ou la partie de transition aval (23) établit(ssent) une transition en rotation respectivement entre la partie centrale (22) et un segment tubulaire de section circulaire, et entre la partie centrale (22) et le segment tubulaire aval (30).

8. Tube (100) pour un four de vapocraquage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la partie de transition amont (21) et/ou la partie de transition aval (23) établit(ssent) une transition linéaire en rotation respectivement entre la partie centrale (22) et un segment tubulaire de section circulaire, et entre la partie centrale (22) et le segment tubulaire aval (30).

9. Tube (100) pour un four de vapocraquage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le segment tubulaire torsadé (20) présente une longueur comprise entre cinq fois le diamètre principal (D) et vingt fois le diamètre principal (D).

10. Tube (100) pour un four de vapocraquage selon l'une des revendications précédentes, comprenant au moins un segment tubulaire amont (10), de section circulaire présentant le diamètre principal (D), relié à la partie de transition amont (21) du segment tubulaire torsadé (20).

11. Tube (100) pour four de vapocraquage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel un segment tubulaire

torsadé (20) est présent pour chaque tronçon du tube présentant une longueur de l'ordre de cent fois le diamètre principal (D).

5 **12.** Tube (100) pour four de vapocraquage selon l'une des revendications précédentes, présentant un coude au niveau duquel au moins un segment tubulaire torsadé (20) est présent.

13. Tube (100) pour four de vapocraquage selon la revendication précédente, dans lequel un segment tubulaire torsadé (20) est disposé à chaque extrémité du coude.

10 **14.** Tube (100) pour four de vapocraquage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'aire de la section du segment tubulaire torsadé (20) est sensiblement égale à l'aire de la section circulaire du segment tubulaire aval (30).

15

20

25

30

35

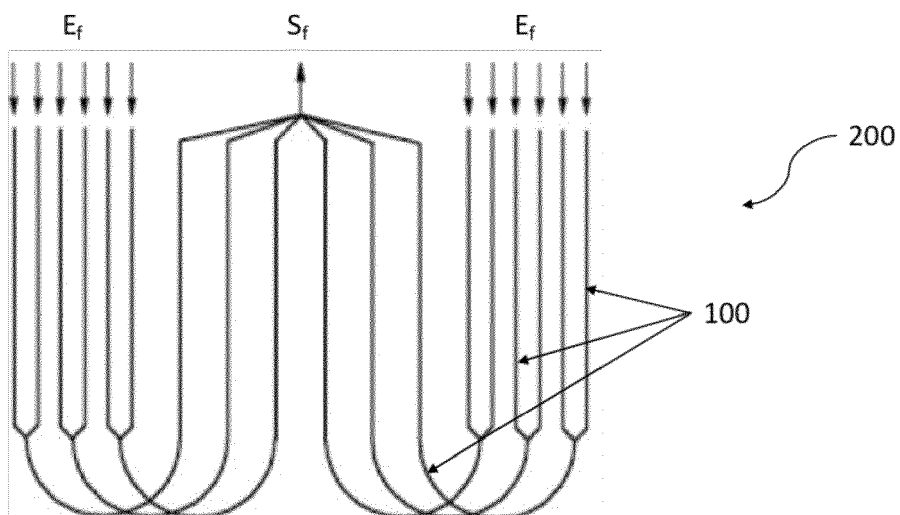
40

45

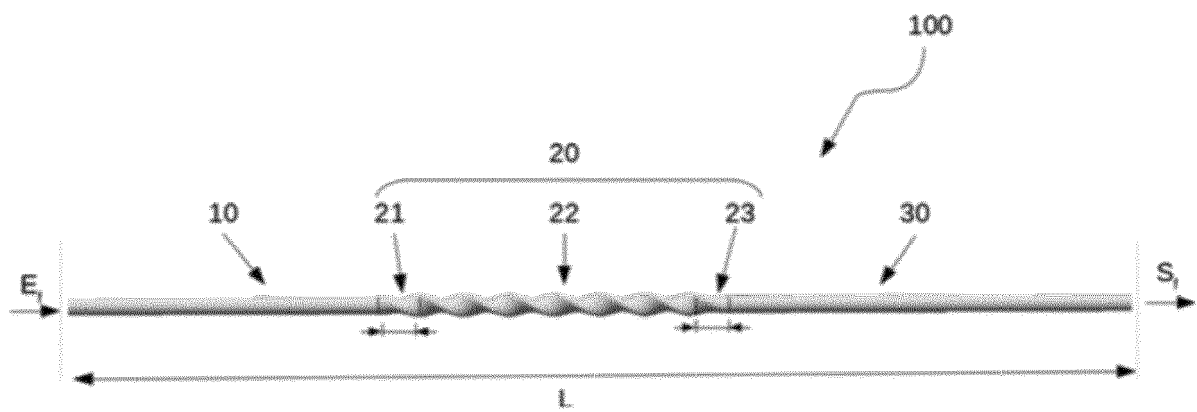
50

55

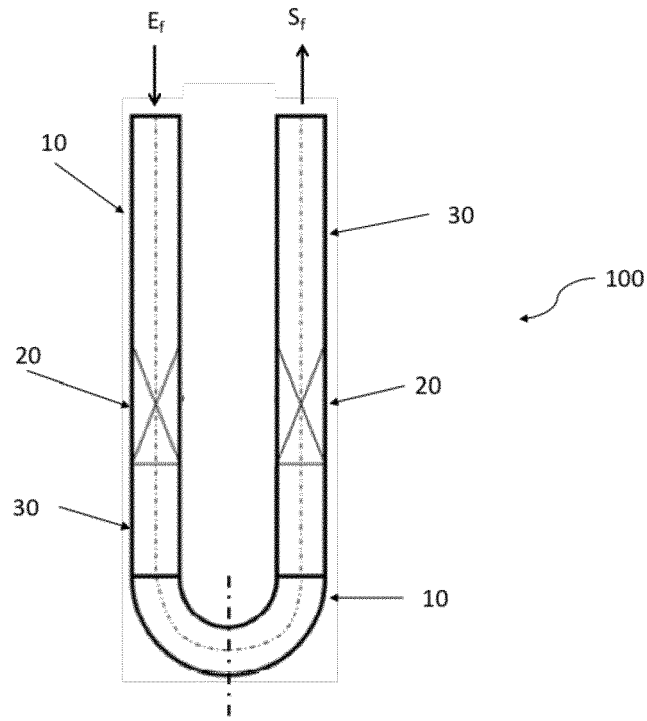
[Fig. 1]



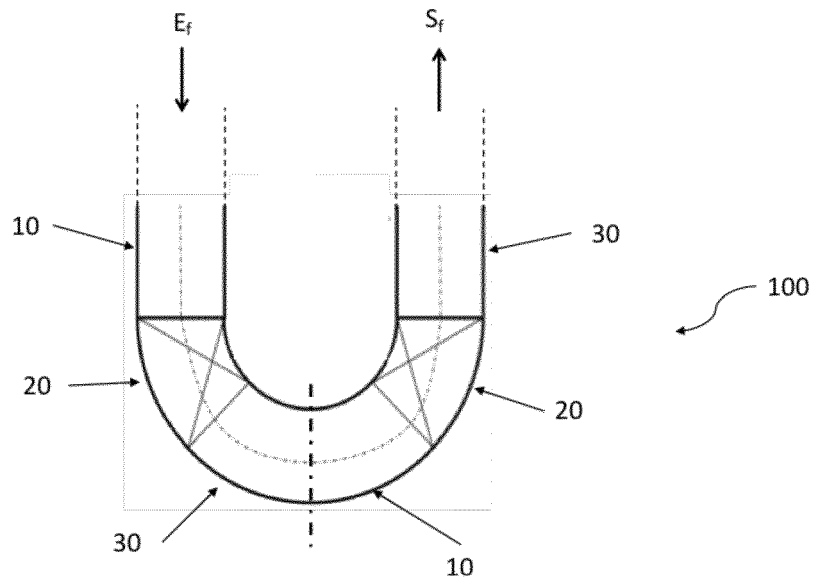
[Fig. 2a]



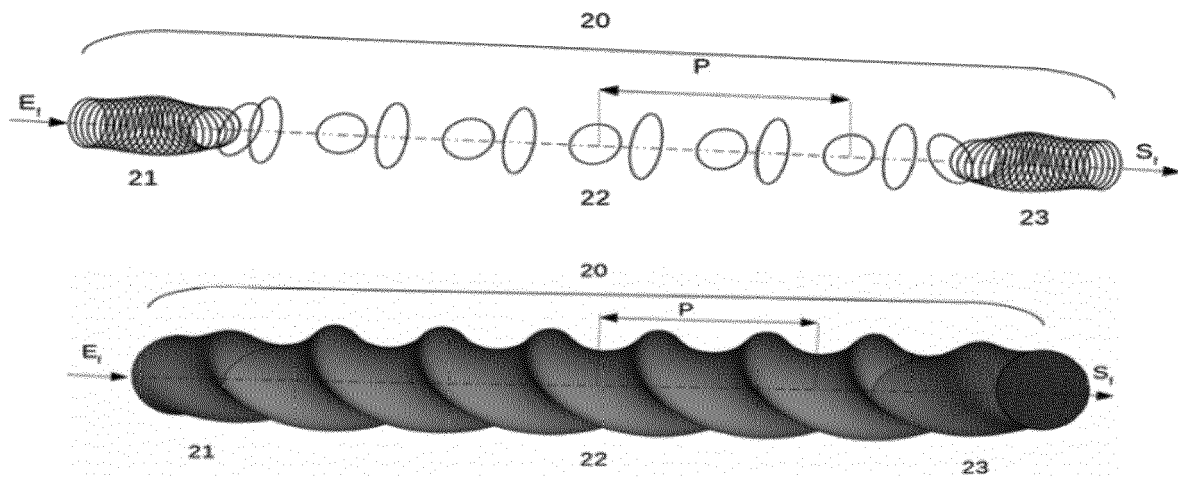
[Fig. 2b]



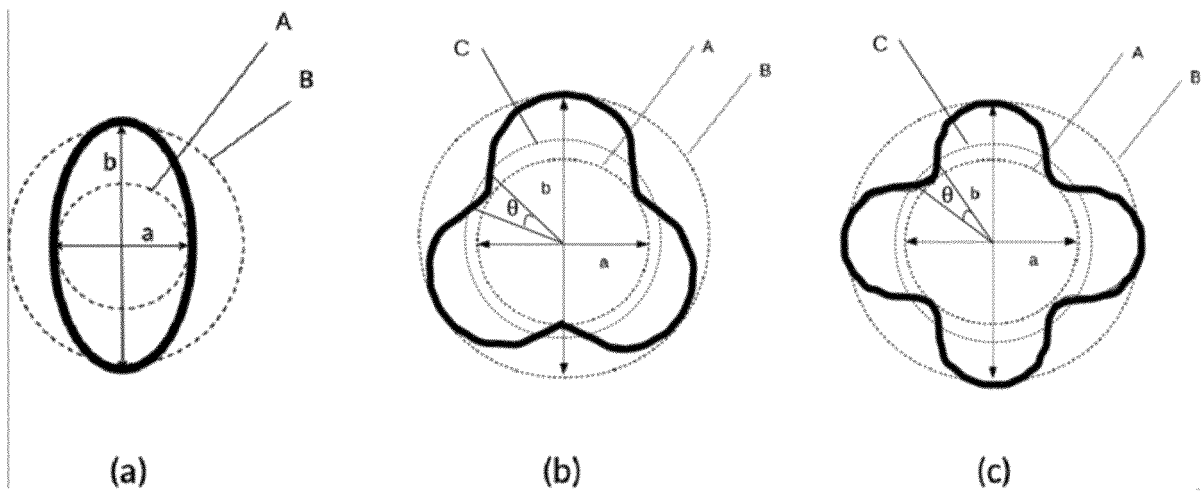
[Fig. 2c]



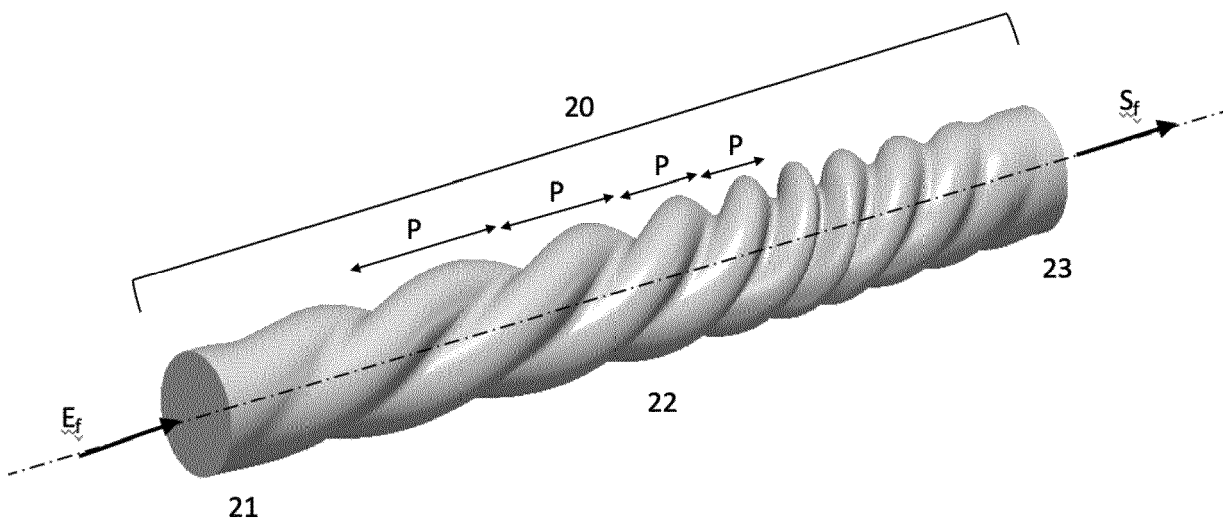
[Fig. 3]



[Fig. 4]



[Fig. 5]





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 20 17 6929

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	CN 102 735 089 A (ZHUHAI GREE REFRIGERATION TECHNOLOGY CT ENERGY SAVING & ENVIRONMENTAL) 17 octobre 2012 (2012-10-17) * figures 1-5 *	1,2,5-14	INV. F28D7/06 F28F1/02 F28F1/08 F28F1/06 F28F13/14 C10G9/20
Y	----- CN 203 758 321 U (GUANGZHOU INST ENERGY CONV CAS ET AL.) 6 août 2014 (2014-08-06) * figures 1-4 *	3,4	
X	----- US 2017/343300 A1 (CLAVELLE E; PETELA G; YAJURE E) 30 novembre 2017 (2017-11-30) * alinéa [0044] *	1	
A	----- EP 1 146 105 A2 (LINDE AG [DE]) 17 octobre 2001 (2001-10-17) * figure 1 *	1	
X	----- US 3 015 355 A (HUMPHREY ALFRED H) 2 janvier 1962 (1962-01-02) * figure 1 *	1	
Y	----- US 4 171 634 A (PERKINS ROBERT W [US]) 23 octobre 1979 (1979-10-23) * figure 6 *	3	
X	----- US 4 171 634 A (PERKINS ROBERT W [US]) 23 octobre 1979 (1979-10-23) * figure 6 *	1	F28D F28F C10G
Y	-----	4	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 7 octobre 2020	Examineur Martínez Rico, Celia
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES 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 antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

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

EP 20 17 6929

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

07-10-2020

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CN 102735089 A	17-10-2012	AUCUN	
CN 203758321 U	06-08-2014	AUCUN	
US 2017343300 A1	30-11-2017	CA 2930824 A1 TW 201809574 A US 2017343300 A1 US 2019257591 A1 US 2020141660 A1 WO 2017203377 A1	25-11-2017 16-03-2018 30-11-2017 22-08-2019 07-05-2020 30-11-2017
EP 1146105 A2	17-10-2001	AT 244748 T BR 0101447 A DE 10018201 A1 EP 1146105 A2 ES 2202236 T3 HU 0101430 A2 PT 1146105 E	15-07-2003 04-12-2001 25-10-2001 17-10-2001 01-04-2004 28-01-2002 28-11-2003
US 3015355 A	02-01-1962	AUCUN	
US 4171634 A	23-10-1979	AUCUN	

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

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

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

Documents brevets cités dans la description

- EP 1561795 A [0006]
- US 20050131263 A [0006]
- US 7749462 B [0007]
- US 6530422 B [0008]

Littérature non-brevet citée dans la description

- **TANG et al.** Experimental and numerical investigation of convective heat transfer and fluid flow in twisted spiral tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 90, 523-541 [0045]