

CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) **CH** **697 571 B1**

(51) Int. Cl.: **B41J 19/32** (2006.01)

Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

(12) **FASCICULE DU BREVET**

(21) Numéro de la demande: 01049/06

(22) Date de dépôt: 30.06.2006

(30) Priorité: 28.10.2005 FR 0511051

(24) Brevet délivré: 15.12.2008

(45) Fascicule du brevet publié: 15.12.2008

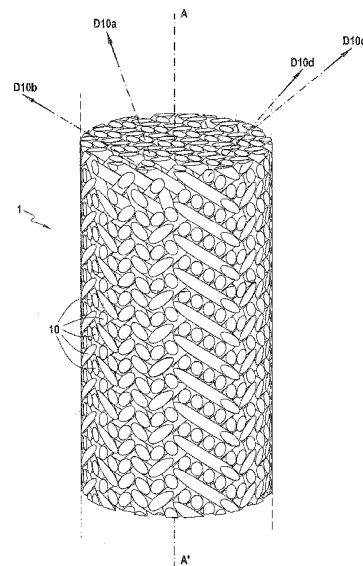
(73) Titulaire(s):
Snecma Propulsion Solide, Le Haillan les Cinq Chemins
33187 Le Haillan Cedex (FR)

(72) Inventeur(s):
Rémi Bessettes, 33370 Tresses (FR)
MAUMUS, Jean-Pierre, F-33160 St Medart en Jalles (FR)

(74) Mandataire:
MICHELI & CIE SA, 122, Rue de Genève Case postale 61
1226 Thonex (CH)

(54) **Structure de garnissage pour colonne d'échange de fluides.**

(57) L'invention concerne une structure de garnissage (1) d'une colonne d'échange de fluides, ladite structure définissant une surface d'échange pour au moins une phase liquide descendante destinée à être mise en contact intime avec au moins avec une phase gazeuse ascendante, caractérisée en ce qu'elle comprend un volume formé d'une pluralité de rangées de faisceaux de tubes (10), chaque faisceau comprenant quatre tubes (10a–10d) respectivement orientés suivant quatre directions (D10a–D10d) formant un angle avec l'axe de la structure, la pluralité de tubes formant une pluralité de passages débouchant à la surface externe de la structure (1).



Description

Arrière-plan de l'invention

[0001] La présente invention se rapporte au domaine général des équipements d'échange de fluides. Ce type d'équipement bien connu comporte généralement une enceinte cylindrique ou colonne d'échange à l'intérieur de laquelle on réalise l'échange entre au moins deux fluides. L'échange consiste le plus souvent à réaliser un échange (de substances, de chaleur,...) entre une phase liquide descendante et une phase gazeuse ascendante. Les colonnes d'échange sont utilisées notamment pour réaliser des opérations telles que des distillations (colonne à distiller), condensations, rectifications, absorptions, désorptions, séparations, extractions, précipitations, réactions chimiques, etc.

[0002] Afin de favoriser l'échange entre les fluides, il est connu d'introduire dans la colonne des éléments de garnissage qui augmentent la surface de contact entre les fluides. Ces éléments peuvent être par exemple des plateaux, des anneaux (ex. anneau de Raschig), des spirales, etc.

[0003] Il est également connu d'utiliser des empilements de grilles ou claies, des bourres de fibres, etc.

[0004] Cependant, il existe une limite à l'accroissement de la surface d'échange dans une colonne: le débit. En effet, en augmentant la surface d'échange à l'intérieur de la colonne, on augmente le rendement du traitement en favorisant le contact intime entre les fluides. Toutefois, si cette augmentation de surface d'échange est obtenue au détriment du débit dans la colonne, par exemple en utilisant une garniture trop dense, on pénalise le rendement du traitement par diminution du débit des fluides (renouvellement), ce qui annihile en partie les effets de l'accroissement de la surface d'échange.

Objet et résumé de l'invention

[0005] La présente invention a pour but de proposer une nouvelle conception de garnissage pour colonne d'échange de fluide qui permet d'optimiser la surface d'échange entre les fluides sans pénaliser le débit dans la colonne.

[0006] Ce but est atteint du fait que, conformément à l'invention, la structure de garnissage comprend un volume constitué d'une pluralité de rangées de faisceaux de tubes, chaque faisceau comprenant quatre tubes respectivement orientés suivant quatre directions formant un angle avec l'axe de la structure, la pluralité de tubes formant une pluralité de passages débouchant à la surface externe de la structure.

[0007] Ainsi, la structure de garnissage de l'invention offre une surface d'échange importante tout en préservant le débit. En effet, l'échange entre les fluides circulant dans la structure est réalisé aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des tubes qui eux-mêmes forment une multitudes de chemins de circulation favorisant le débit dans la colonne.

[0008] Le volume de la structure peut comporter en outre une pluralité de porosités entre les tubes définissant des passages supplémentaires pour la phase liquide et la phase gazeuse dans la structure.

[0009] Les tubes peuvent être en matériau composite carbone-carbone ou céramique, en métal, en matériau thermoplastique, ou en matériau thermodurcissable.

[0010] La surface d'échange peut encore être augmentée avec des tubes présentant des macroporosités ménageant des passages entre l'intérieur et l'extérieur des tubes.

[0011] La surface des tubes peut en outre comprendre un catalyseur chimique.

[0012] La présente invention concerne également un procédé de fabrication d'une structure de garnissage d'une colonne d'échange de fluides, caractérisé en ce qu'il comprend:

- a) la formation de tubes;
- b) la construction d'un assemblage ordonné desdits tubes suivant une pluralité de rangées de faisceaux de tubes, chaque faisceau comprenant quatre tubes respectivement orientés suivant quatre directions;
- c) la liaison des tubes au niveau de leur portion de contact;
- d) l'usinage de l'assemblage ordonné pour former une structure de garnissage adaptée à la forme et aux dimensions internes de la colonne dans laquelle elle est destinée à être insérée.

[0013] Selon un aspect de l'invention, dans l'étape a), les tubes sont formés en matériau composite carbone ou céramique. Dans ce cas, le procédé peut comprendre en outre une étape de carbonisation des tubes par traitement thermique suivi d'une étape de dépôt en phase gazeuse (CVD) de carbone.

[0014] Selon un autre aspect de l'invention, les tubes sont formés en matériau composite carbone et le procédé comprend en outre une étape d'oxydation des tubes pour rendre leur surface hydrophile. A la suite de cette étape, on peut recouvrir la surface des tubes avec un catalyseur en imprégnant les tubes avec une solution contenant le catalyseur et en séchant cette solution par évaporation pour ne laisser subsister que le catalyseur à la surface des tubes.

Brève description des dessins

[0015] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, en référence aux dessins annexés, sur lesquels:

- la fig. 1 est un ordinogramme illustrant des étapes successives d'un mode de mise en œuvre d'un procédé de fabrication d'une structure de garnissage conforme à l'invention;
- les fig. 2A à 2D sont des vues en perspective montrant la construction d'un assemblage ordonné de tubes conformément à l'invention;
- les fig. 3A et 3B sont des photographies montrant la réalisation d'un assemblage ordonné de tubes conformément à l'invention;
- la fig. 4 est une vue en perspective d'un mode de réalisation d'une structure de garnissage conforme à l'invention;
- les fig. 5A et 5B sont des photographies montrant un exemple de réalisation d'une structure de garnissage de la présente invention;
- la fig. 6 montre un exemple d'intégration de la structure de garnissage de la fig. 3 dans une colonne d'échange de fluide;
- la fig. 7 illustre très schématiquement le dépôt en solution d'un catalyseur sur une surface hydrophobe;
- la fig. 8 illustre très schématiquement le dépôt en solution d'un catalyseur sur une surface hydrophile.

Description détaillée d'un mode de réalisation

[0016] On décrit tout d'abord un procédé de fabrication d'une structure de garnissage conforme à un mode de réalisation de l'invention en relation avec les fig. 1 à 4.

[0017] La structure est formée à partir d'un assemblage de tubes. La première étape (étape S1) consiste donc à former des tubes. Les tubes peuvent être réalisés en matériau composite tel que du carbone ou de la céramique (SiC), ou bien encore en matériau métallique, thermoplastique ou thermodurcissable. Les tubes présentent de préférence une épaisseur de paroi aussi mince que possible.

[0018] Dans le cas de tubes en matériau composite (ex. tubes carbone ou SiC), les tubes peuvent être formés, par exemple, à partir de tresses, d'enroulements filamenteux, de bandes enroulées ou de tubes pultrudés ou non qui sont maintenus en forme sur une tige support et consolidés par voie liquide, c'est-à-dire en imprégnant la tresse avec une résine cokéifiable et infiltrable, telle qu'une résine phénolique, et en réticulant la résine par traitement thermique.

[0019] Les tubes sont formés de préférence en matériau composite carbone/carbone qui est connu pour sa capacité à résister aux acides et à la corrosion.

[0020] On construit ensuite un assemblage ordonné avec les tubes formés lors de l'étape précédente. Les tubes sont disposés suivant quatre directions distinctes (étape S2). La fig. 2A illustre un faisceau de quatre tubes 10a à 10d, chacun disposé suivant l'une des quatre directions d'assemblage D10a à D10d. Les quatre directions D10a à D10d dans lesquelles les tubes sont assemblés correspondent ici respectivement aux quatre diagonales d'un cube (ou quatre hauteurs/arêtes d'un tétraèdre régulier), à ceci près que les tubes ne s'entrecoupent pas au niveau de l'intersection des diagonales au centre du cube mais s'entrecroisent au voisinage de ce point.

[0021] La construction de l'assemblage ordonné peut débuter par exemple en répétant la disposition de la fig. 2A, c'est-à-dire en disposant suivant un axe de construction XX', correspondant au point d'entrecroisement des quatre tubes d'un faisceau, un nouveau faisceau de tubes 10a à 10d disposés dans le même ordre que le faisceau précédent et ainsi de suite. On obtient ainsi, comme représenté sur la fig. 2B, un début d'assemblage ordonné formé d'une première rangée 100a de faisceaux de tubes 10a à 10d alignés suivant l'axe XX'. On forme ainsi un entrecroisement de quatre réseaux de tubes 11 à 14 qui s'étendent chacun dans un plan orienté suivant une des quatre directions d'assemblage des tubes dans un faisceau. Les tubes de chaque réseau sont espacés les uns des autres par une distance permettant le passage (entrecroisement) des tubes des autres réseaux.

[0022] Lorsqu'on a atteint le nombre désiré de faisceaux dans la rangée 100a, on superpose ensuite plusieurs séries de rangées de faisceaux suivant des axes parallèles à l'axe XX' de manière à remplir le volume libre autour de la rangée 100a. La fig. 2C illustre la disposition d'une rangée supplémentaire 100b de faisceaux selon un nouvel axe XbX'b parallèle à l'axe de construction XX'. On complète ensuite de la même façon le volume libre de part et d'autre de la rangée 100a, typiquement jusqu'à l'extrémité des tubes de la rangée 100a, de manière à obtenir dans ce volume une structure tridimensionnelle formée de tubes respectivement disposés suivant quatre directions. Les fig. 3A et 3B montrent la réalisation d'un tel assemblage avec des tubes 10 maintenus sur un outillage.

[0023] On obtient alors un assemblage ordonné qui présente une forme sensiblement parallélépipédique comme illustrée sur la fig. 2D. L'assemblage ordonné ainsi obtenu comprend une pluralité de tubes 10 qui débouchent sur toutes les faces de l'assemblage.

[0024] Le document US 4 168 337 décrit en détail un procédé pour réaliser un assemblage ordonné à l'aide d'éléments rectilignes disposés suivant quatre directions.

[0025] On réalise ensuite une liaison entre les tubes (étape S3). La liaison est réalisée seulement au niveau des portions de contact entre les tubes afin de conserver des porosités ou passages entre les tubes pour ménager des voies de circulation supplémentaires pour les fluides à l'extérieur des tubes. La liaison entre les tubes peut être réalisée, par exemple, à l'aide d'une résine en prenant soin de contrôler la quantité de résine déposée pour ne pas obstruer les porosités entre les tubes.

[0026] On procède ensuite à l'usinage de l'assemblage pour former une structure de garnissage ajustée aux dimensions et à la forme de la colonne d'échange de fluides à l'intérieur de laquelle elle est destinée à être placée (étape S4).

[0027] Les colonnes d'échange de fluides, telles que les colonnes à distiller, comportent généralement une enceinte de forme cylindrique. Dans ce cas, on usine l'assemblage ordonné pour obtenir une structure de garnissage qui présente elle aussi une forme cylindrique pour occuper un maximum d'espace dans la colonne et offrir ainsi une surface d'échange optimale (fig. 4). La structure de garnissage de l'invention peut toutefois présenter d'autres formes.

[0028] L'usinage de l'assemblage pour former la structure de garnissage peut être réalisé par découpe au jet d'eau sous pression, aux ultrasons, au laser, à la meule, ou autres.

[0029] De façon optionnelle et pour les cas où les tubes sont en matériau composite, par exemple en carbone ou céramique (SiC), un traitement thermique peut être appliqué pour carboniser le bloc de tubes et être suivi éventuellement d'un dépôt en phase gazeuse (CVD) de carbone, ce qui permet de renforcer la liaison entre les tubes et d'accroître leur tenue à la corrosion.

[0030] Conformément au procédé décrit précédemment et comme illustré sur la fig. 4, on obtient une structure de garnissage 1 comprenant un bloc compact de tubes 10 qui sont tous inclinés dans une des quatre directions D10a à D10d par rapport à l'axe AA' de la structure qui correspond à l'axe de la colonne dans laquelle la structure doit être disposée, ce qui permet d'avoir pour chaque tube une pente déterminée permettant d'assurer la descente de la phase liquide à travers la structure.

[0031] Les fig. 5A et 5B montrent respectivement une vue de côté et une vue de dessus d'un exemple de réalisation d'une structure de garnissage réalisée avec des tubes 10 formés à partir de tresses consolidées. La fig. 5B montre en particulier la multitude de chemins de circulation disponibles pour les phases circulant dans la structure de garnissage de la présente invention.

[0032] La fig. 6 illustre un exemple d'intégration de la structure de garnissage 1 à l'intérieur d'une colonne d'échange de fluides destinée à réaliser un mélange entre une phase liquide descendante et une phase gazeuse ascendante. La structure 1 peut être maintenue à l'intérieur d'une enceinte cylindrique 2 de la colonne d'échange de fluides par des plateaux de maintien 3 et 4 ainsi que par une virole 5 ici de forme ondulée mais qui peut être également lisse et comprendre éventuellement des perforations. Les éléments de maintien de la structure de garnissage peuvent être dans le même matériau que cette dernière ou dans un autre matériau.

[0033] Grâce à la géométrie de la structure de garnissage 1, un contact intime entre la phase liquide descendante et la phase gazeuse ascendante peut être réalisé sur une grande surface (surface d'échange). En effet, la phase liquide traverse par gravité la structure de garnissage en empruntant une multitude de passages ménagés dans et/ou à l'extérieur des tubes 10. En descendant, la phase liquide rencontre la phase gazeuse qui remonte dans la structure en empruntant également la multitude de passages permettant ainsi un échange entre les deux phases à de nombreux endroits de la structure et, par conséquent, sur une grande surface d'échange.

[0034] La structure de garnissage selon l'invention offre ainsi une grande surface d'échange pour les fluides, et ce sans pertes de charge importantes. En effet, la structure de garnissage présente une densité de matière relativement faible et un agencement des tubes qui offrent une multitude de passages pour les fluides. Quel que soit l'endroit de la structure, la phase liquide et la phase gazeuse circulent facilement dans et/ou entre les tubes, ce qui évite d'avoir des pertes de charge importantes entre le bas et le haut de la colonne.

[0035] La surface d'échange disponible avec la structure de garnissage, c'est-à-dire la surface de la structure sur laquelle la phase liquide mouille en présence de la phase gazeuse, correspond ici non seulement à la surface interne des tubes mais aussi aux portions de surface externe de ceux-ci qui n'est pas en contact avec un autre tube, les phases liquide et gazeuse pouvant circuler indifféremment à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes.

[0036] La surface d'échange de la structure peut encore être augmentée en ménageant des macroporosités dans la paroi des tubes au travers desquelles la phase liquide peut circuler et être en contact avec la phase gazeuse. Ces macroporosités peuvent être obtenues, par exemple, lorsqu'on forme les tubes à partir de tresses, comme décrit précédemment. Dans ce cas, on augmente l'angle de la tresse en utilisant un tube de maintien de diamètre plus important que la section de la tresse de manière à ménager des macroporosités dans cette dernière lors de sa consolidation.

[0037] Des mesures ont été réalisées sur une structure de garnissage telle que celle illustrée sur les fig. 5A et 5B (structure réalisée avec des tubes de 10 mm formés à partir de tresses de carbone consolidés). Ces mesures ont permis de montrer que la structure de garnissage de l'invention présente des performances similaires sinon supérieures à celles

des structures de garnissages connues. En effet, ces essais ont montré que la structure de garnissage de l'invention présente un taux de vide de l'ordre de 94% (taux de vide constaté pour des structures existantes: entre 92 et 97%), une surface de mouillage (i.e. d'échange) d'environ 600 m²/m³ (contre 150 à 350 m²/m³ pour les structures existantes) et une perte de charge à sec de 0,6 à 7 mbar avec un débit d'air variant de 40 à 100 m³/heure (contre 0,3 à 7 mbar pour les structures existantes).

[0038] La géométrie de la structure de garnissage selon l'invention permet de contrôler les paramètres physiques des fluides dans la colonne (surface d'échange, vitesse d'écoulement, couche limite, etc.) La structure de garnissage peut en outre présenter des propriétés de contact adaptées (ex. angle de mouillage, énergie de surface, adsorption, etc.) à la nature des fluides destinés à la traverser.

[0039] En effet, par exemple, les tubes de la structure peuvent présenter une surface de contact en carbone, soit par la nature même du matériau des tubes, soit par un traitement de surface tel qu'un dépôt de pyrocarbone. Dans ce cas, la surface de contact des tubes et, par conséquent, la surface d'échange de la structure de garnissage est une surface hydrophobe qui est bien mouillée par les hydrocarbures. On utilisera, par conséquent, cette surface telle quelle dans le cas de fluides organiques.

[0040] En revanche, en présence d'une phase aqueuse, cette surface d'échange hydrophobe ne peut convenir. Toutefois, une surface de carbone hydrophobe peut être rendue hydrophile par des traitements thermochimiques connus de l'homme de l'art. Parmi ces traitements, il existe en particulier des traitements d'oxydation qui modifient la rugosité de surface et surtout l'énergie de surface par la technique de greffage de fonctions, encore appelée fonctionnalisation de surface. Cette oxydation, à considérer en termes de transfert d'électrons, peut être réalisée par:

- oxydation ménagée à l'air avec passage à une température supérieure à 400°C ou par application d'un plasma;
- oxydation chimique par un oxydant en solution comme par exemple de l'eau de Javel, de l'acide nitrique, eau oxygénée, etc.;
- oxydation électrochimique en utilisant la structure de garnissage comme électrode (anode ou cathode) dans une cuve à électrolyse.

[0041] A la suite d'un de ces traitements d'oxydation et en présence d'une phase oxydante contenant de l'oxygène, la surface de contact en carbone possède des fonctions polaires greffées, telles que des fonctions hydroxydes, carboxyles ou quinone. On peut également obtenir d'autres types de fonctions, telles que des amines en présence de phases oxydantes contenant des fonctions azotées.

[0042] La présence de ces fonctions modifie la mouillabilité de la surface, en particulier vis-à-vis de solvants polaires tels que l'eau.

[0043] Cette fonctionnalisation de surface présente en outre un avantage dans le cas où la surface d'échange de la structure de garnissage est destinée à servir en outre de support pour un catalyseur nécessaire à une réaction chimique ultérieure. En effet, l'adjonction d'un catalyseur (ou d'un précurseur de ce dernier) est réalisée par imprégnation de la structure avec une solution permettant d'apporter et de répartir le catalyseur. La solution est ensuite séchée par évaporation de manière à ne laisser subsister en surface que le catalyseur.

[0044] Or, dans le cas d'une surface hydrophobe 15 comme illustré sur la fig. 7, en raison d'un angle de mouillage important de la surface, une solution 20 contenant un catalyseur 21 se regroupe sous forme de grosses gouttelettes individuelles 22 qui ne coalescent pas, si bien, qu'après séchage, le catalyseur 21 est réparti ponctuellement en gros amas 23, ce qui conduit à une répartition non uniforme de catalyseur pénalisant le rendement de la réaction chimique ultérieure.

[0045] La fig. 8 montre le cas d'une fonctionnalisation permettant de doter la structure d'une surface de contact hydrophile 16 présentant un faible angle de mouillage. On observe que, dans ce cas, la solution 20 contenant le catalyseur 21 se répartit et sèche sous la forme d'un film uniforme 24, ce qui permet d'obtenir au final une bonne répartition du catalyseur 21 à la surface de la structure et, par conséquent, un meilleur contrôle de la réaction chimique ultérieure avec le catalyseur.

Revendications

1. Structure de garnissage (1) d'une colonne d'échange de fluides, ladite structure définissant une surface d'échange pour au moins une phase liquide descendante destinée à être mise en contact intime avec au moins avec une phase gazeuse ascendante, caractérisée en ce qu'elle comprend un volume formé d'une pluralité de rangées de faisceaux de tubes (10), chaque faisceau comprenant quatre tubes (10a–10d) respectivement orientés suivant quatre directions (D10a–D10d) inclinées par rapport à l'axe (AA') de la structure, la pluralité de tubes formant une pluralité de passages débouchant à la surface externe de la structure (1).
2. Structure selon la revendication 1, caractérisée en ce que les quatre tubes (10a–10d) d'un faisceau sont orientés suivant les quatre diagonales d'un cube.
3. Structure selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que les tubes (10) sont liés entre eux au niveau de leur portion de contact.

4. Structure selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que le volume comporte une pluralité de porosités entre les tubes (10) définissant des passages supplémentaires pour la phase liquide et la phase gazeuse dans la structure.
5. Structure selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce qu'elle présente une forme cylindrique, chaque tube (10) étant incliné par rapport à l'axe (AA') de la structure cylindrique.
6. Structure selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisée en ce que les tubes (10) sont en matériau composite, ou en métal, ou en matériau thermoplastique, ou en matériau thermodurcissable.
7. Structure selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisée en ce que les tubes (10) sont en matériau composite carbone-carbone ou céramique.
8. Structure selon la revendication 7, caractérisée en ce que les tubes (10) présentent des macroporosités ménageant des passages entre l'intérieur et l'extérieur des tubes.
9. Structure selon la revendication 7 ou 8, caractérisée en ce que les tubes (10) sont en matériau composite carbone et comprennent un catalyseur chimique (21) sur leur surface (16).
10. Procédé de fabrication d'une structure de garnissage (1) d'une colonne d'échange de fluides, caractérisé en ce qu'il comprend:
 - a) la formation de tubes (10);
 - b) la construction d'un assemblage ordonné desdits tubes suivant une pluralité de rangées de faisceaux de tubes (10a-10d), chaque faisceau comprenant quatre tubes respectivement orientés suivant quatre directions (D10a-D10d);
 - c) la liaison des tubes (10) au niveau de leur portion de contact;
 - d) l'usinage de l'assemblage ordonné pour former une structure de garnissage adaptée à la forme et aux dimensions internes de la colonne dans laquelle elle est destinée à être insérée, les tubes (10) étant inclinés dans une des quatre directions (D10a-D10d) par rapport à l'axe (AA') de la structure et formant une pluralité de passages débouchant à la surface externe de la structure (1).
11. Procédé selon la revendication 10, caractérisé en ce que, dans l'étape a), les tubes (10) sont formés en matériau composite, ou en métal, ou en matériau thermoplastique, ou en matériau thermodurcissable.
12. Procédé selon la revendication 11, caractérisé en ce que, dans l'étape a), les tubes (10) sont formés en matériau composite carbone ou céramique.
13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape de carbonisation des tubes (10) par traitement thermique suivi d'une étape de dépôt en phase gazeuse (CVD) de carbone.
14. Procédé selon l'une quelconque des revendications 10 à 13, caractérisé en ce que, dans l'étape b), les quatre tubes (10a-10d) de chaque faisceau sont orientés suivant les quatre diagonales d'un cube.
15. Procédé selon la revendication 10, caractérisé en ce que, dans l'étape a), les tubes (10) sont formés en matériau composite carbone et en ce que le procédé comprend en outre une étape d'oxydation desdits tubes pour rendre leur surface (16) hydrophile.
16. Procédé selon la revendication 15, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape d'imprégnation des tubes avec une solution (20) contenant un catalyseur chimique (21) et une étape de séchage de la solution.

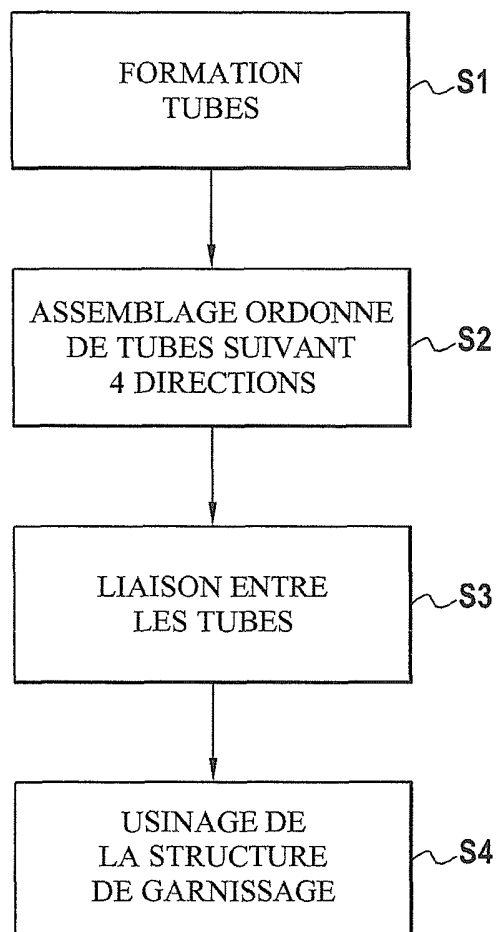
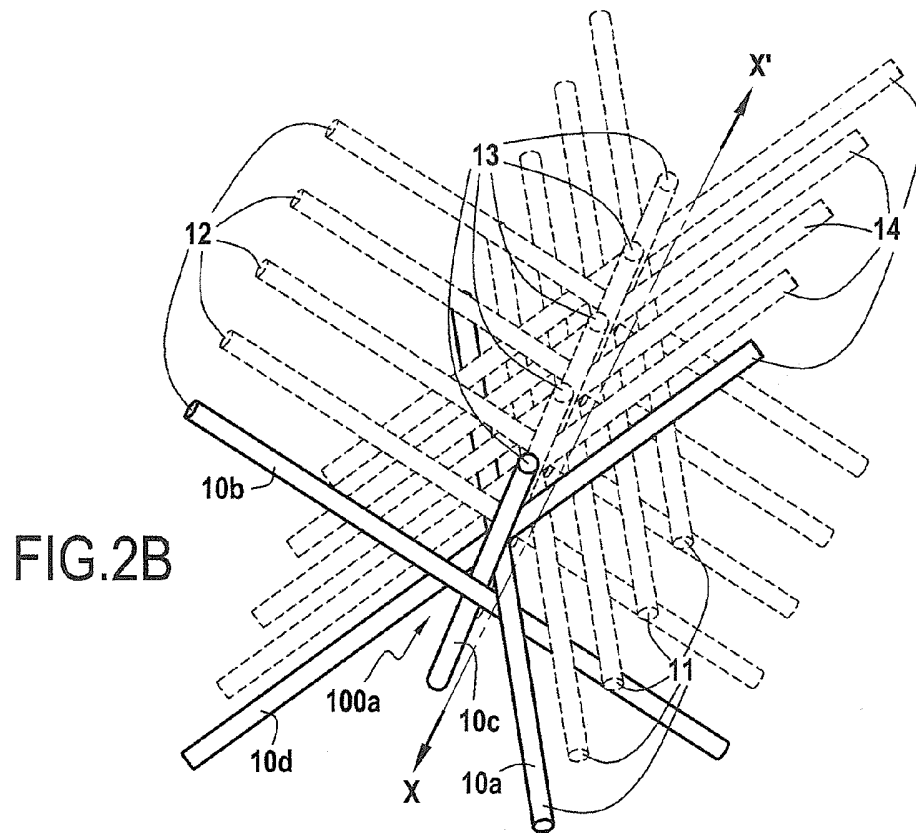
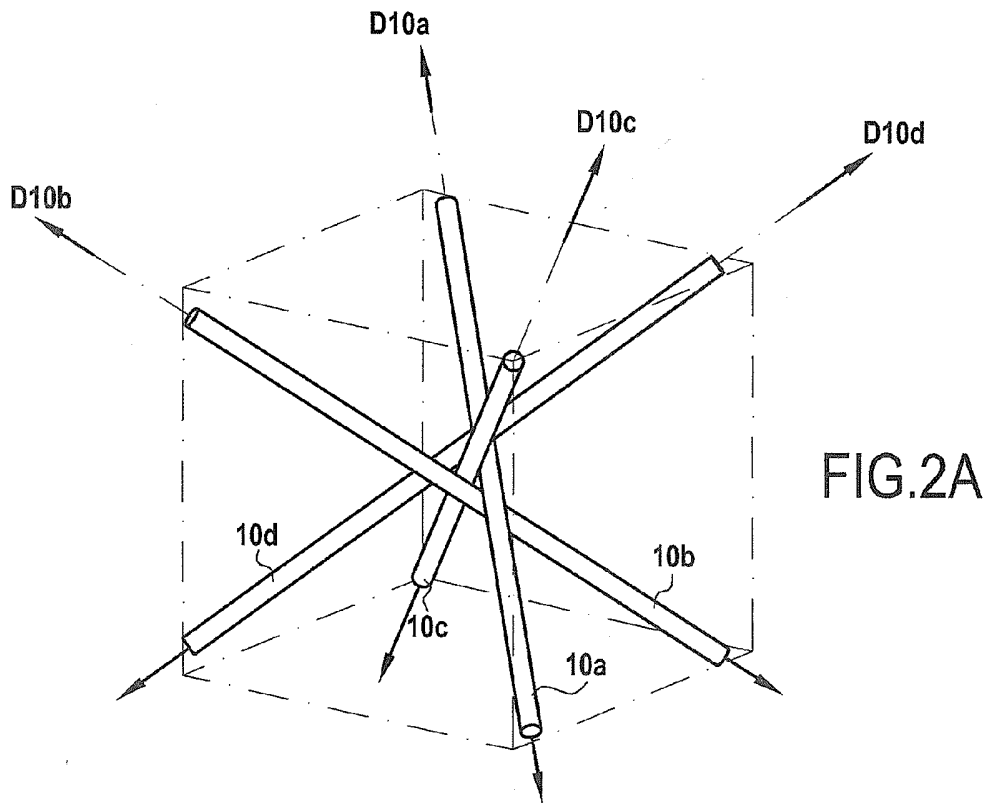


FIG.1



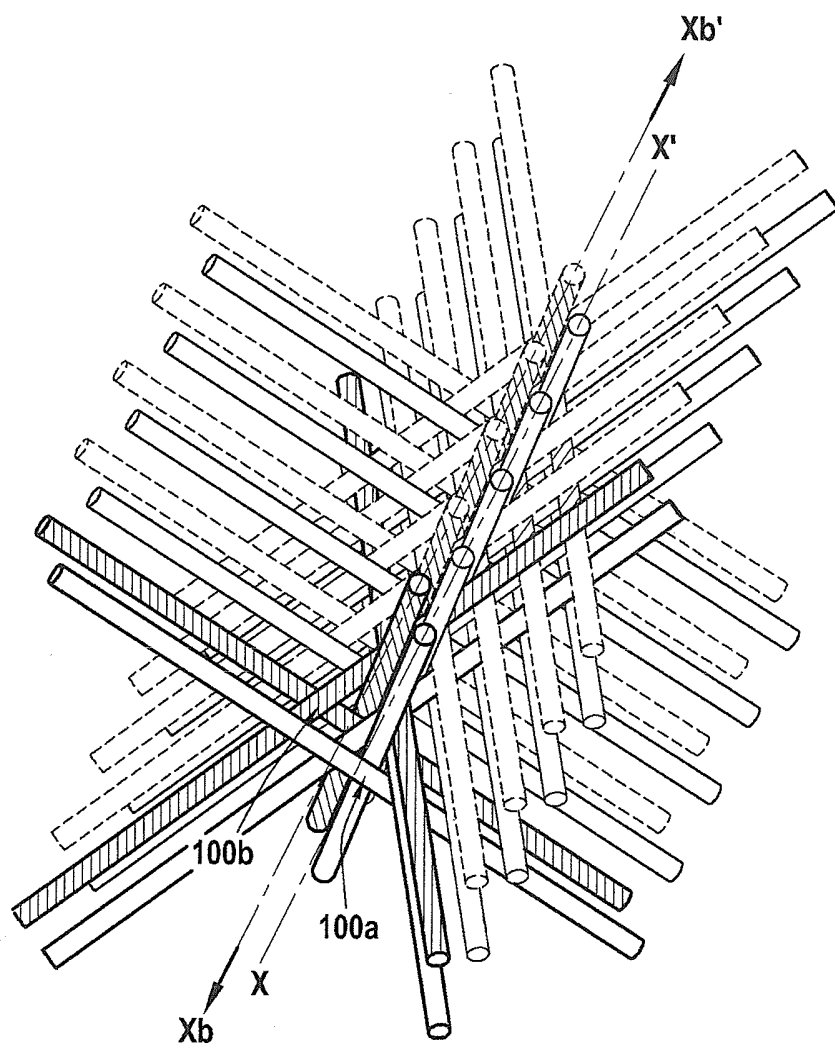
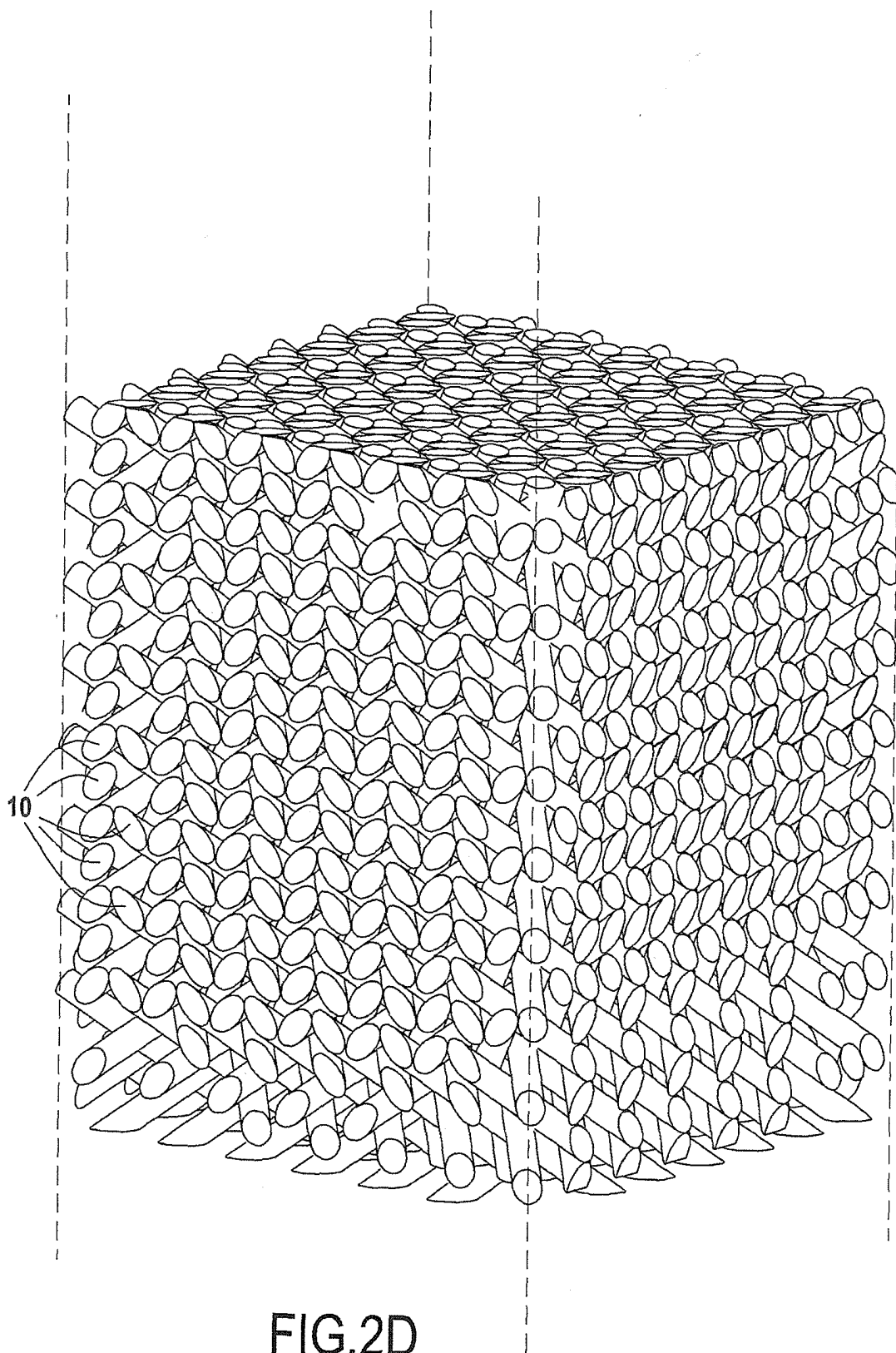


FIG.2C



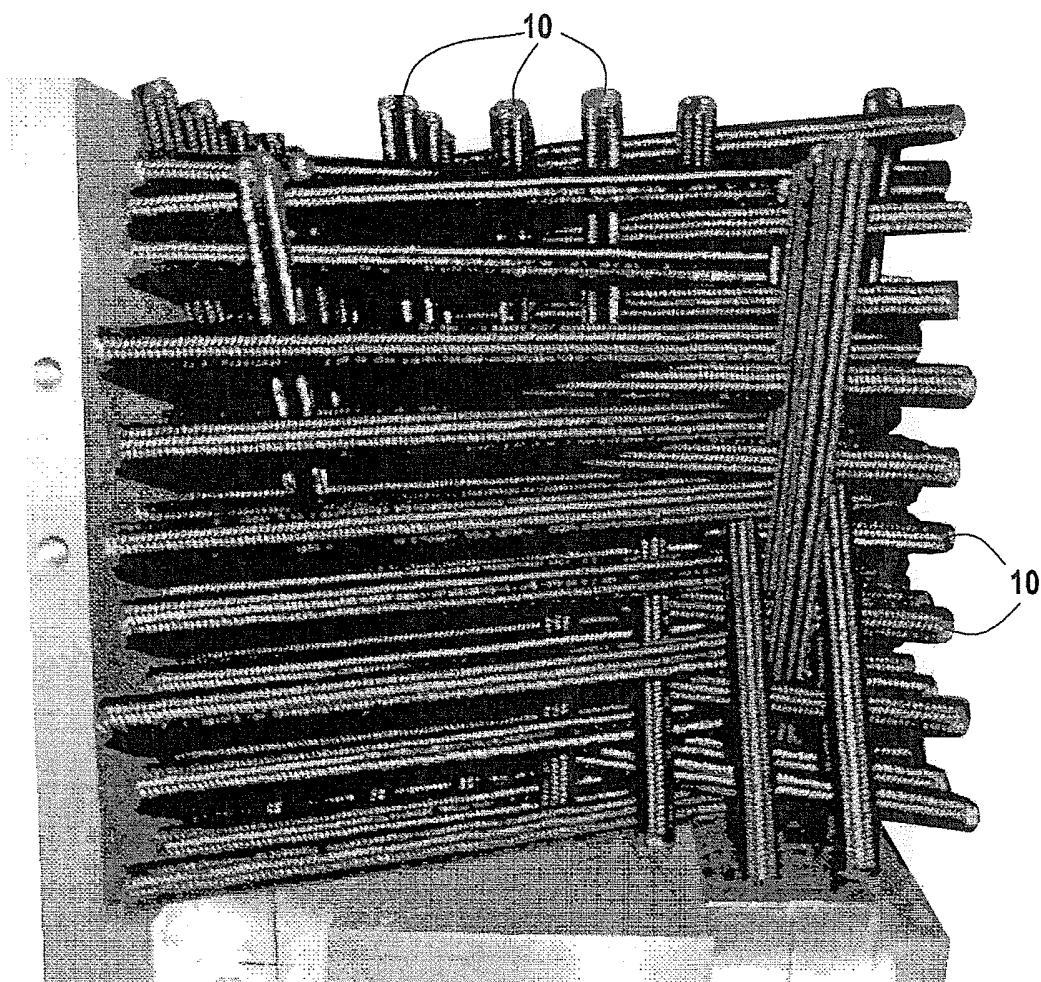


FIG.3A

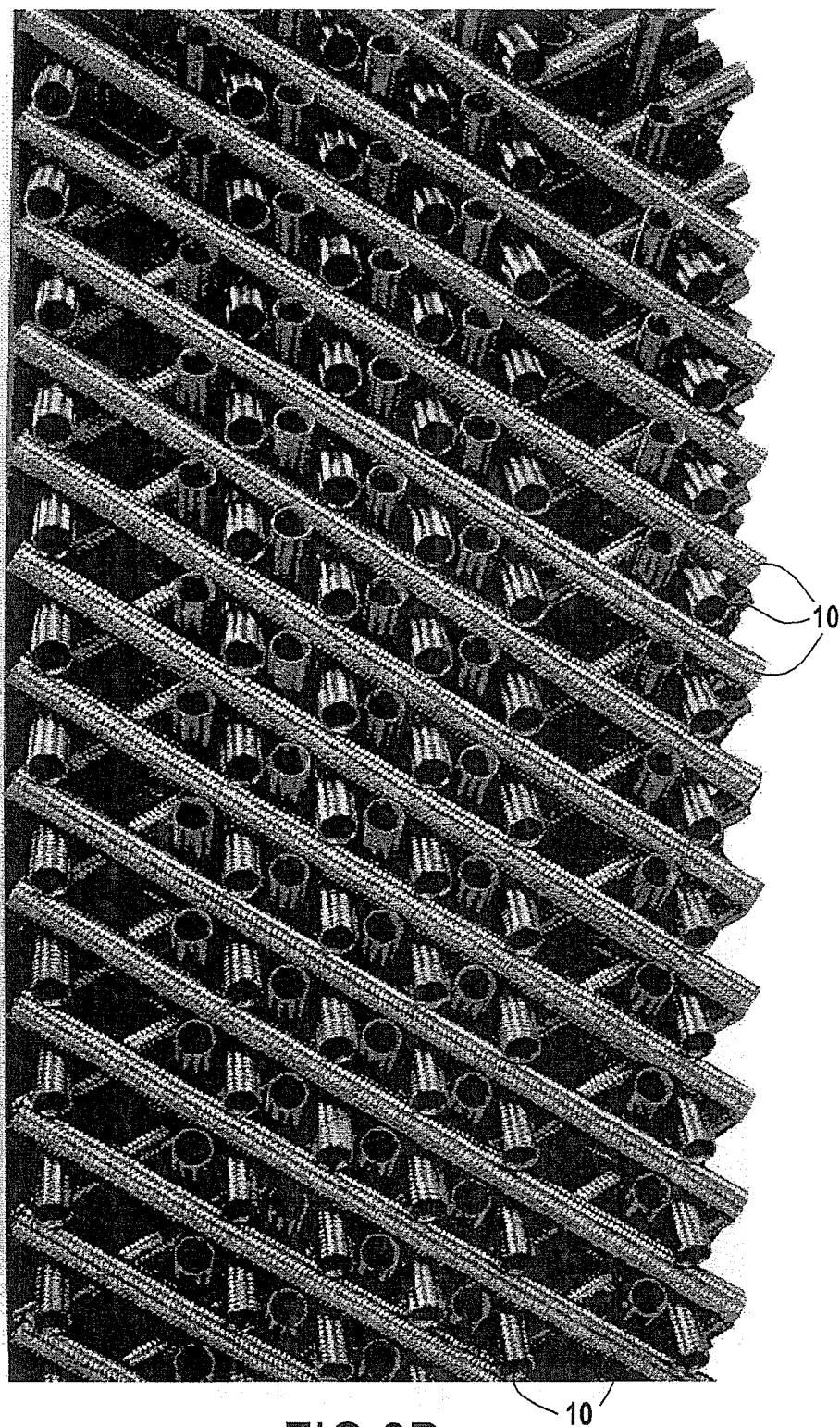
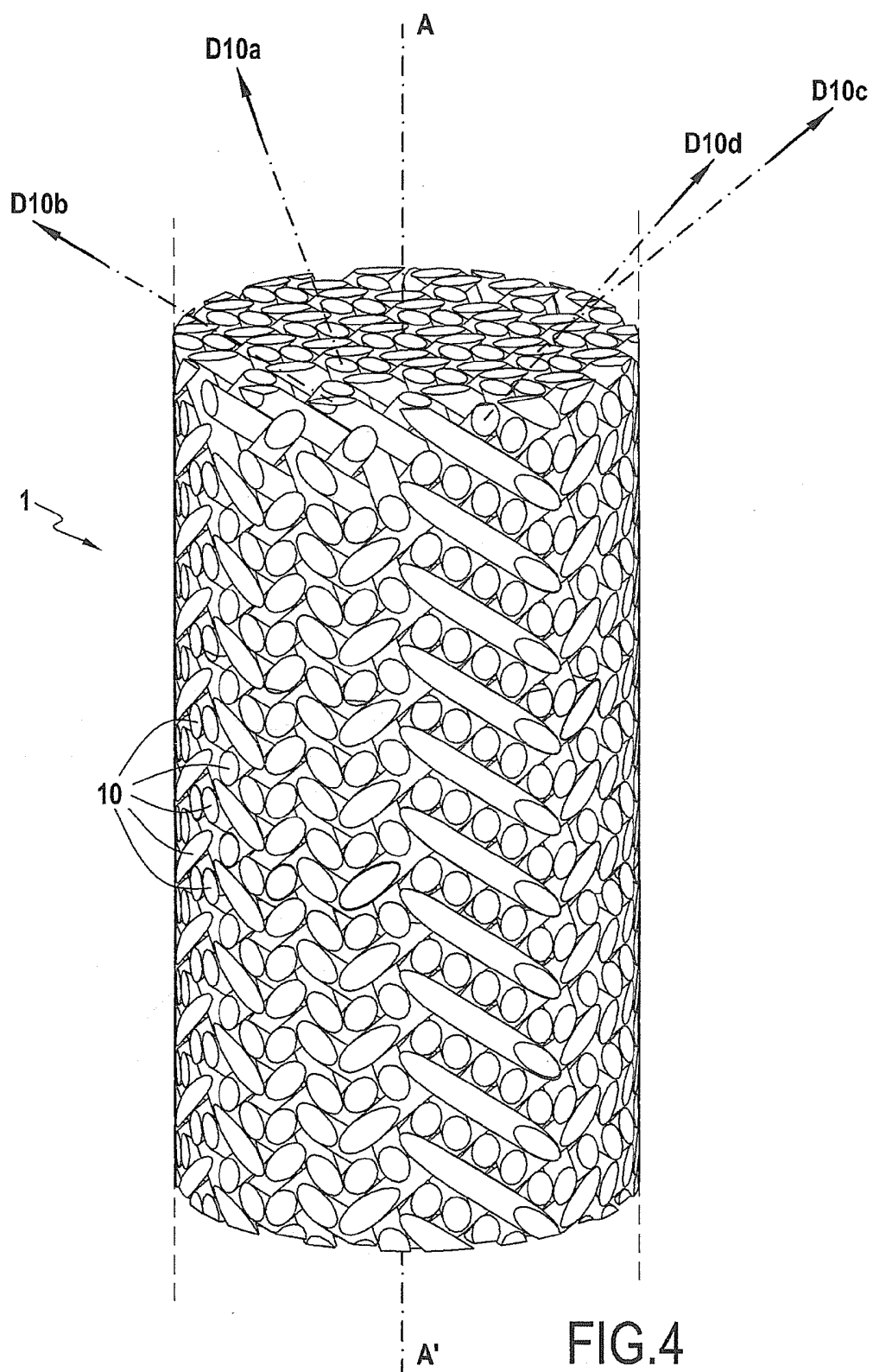


FIG.3B



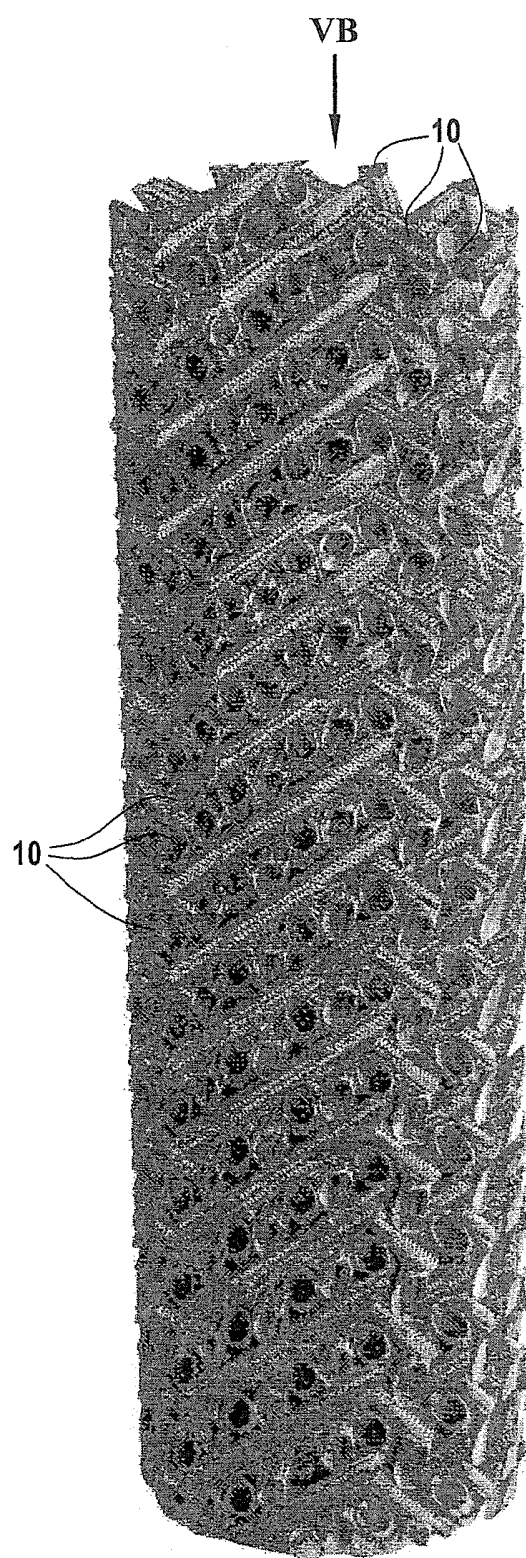


FIG.5A

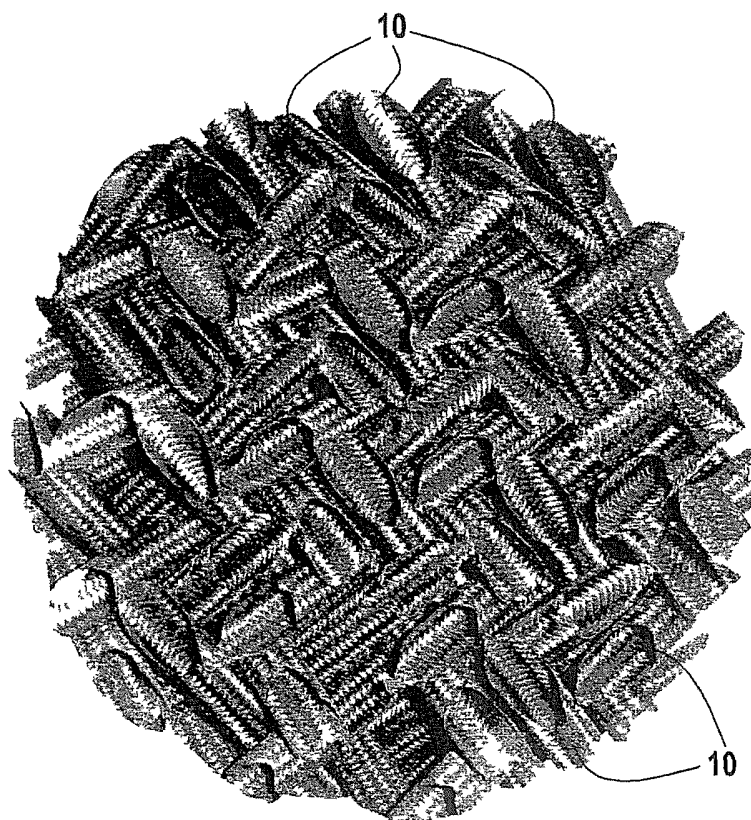


FIG. 5B

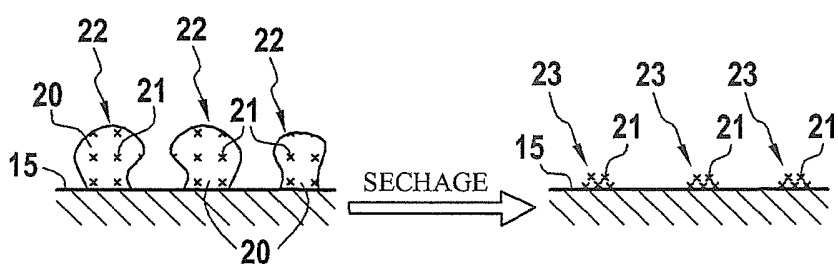


FIG. 7

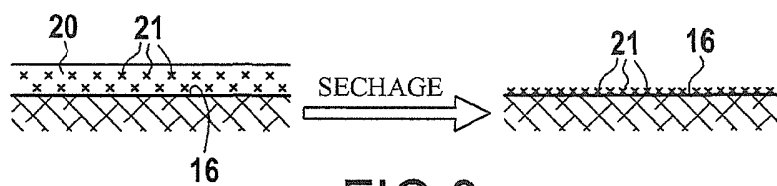


FIG. 8

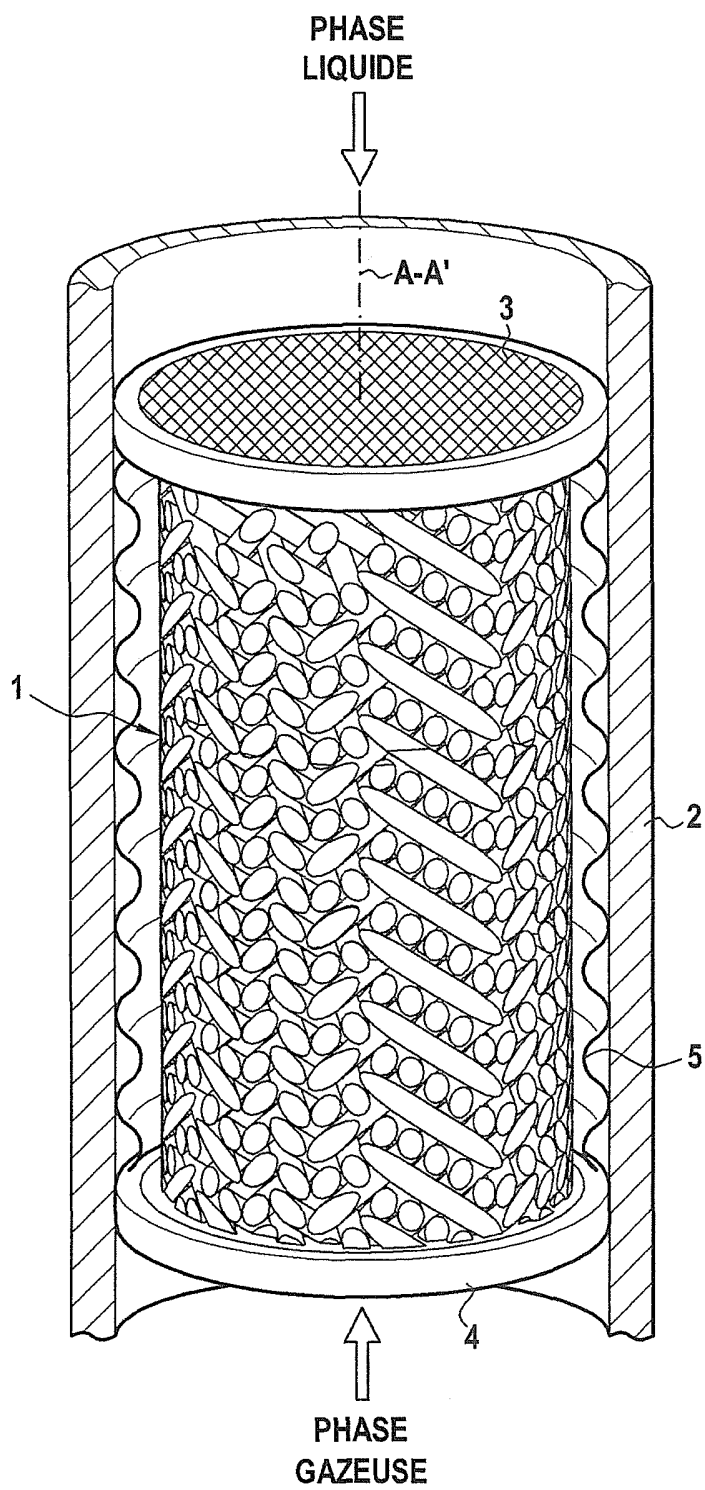


FIG.6