

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

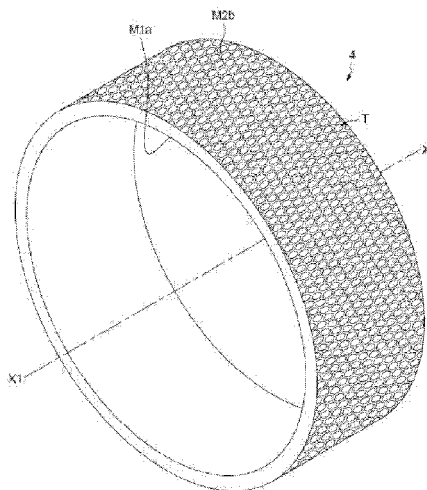
22 Date de dépôt : 07.12.23.	71 Demandeur(s) : COMPAGNIE GENERALE DES ETABLISSEMENTS MICHELIN Société en commandite par actions — FR.
30 Priorité :	72 Inventeur(s) : DELMAS Guillaume, CHABRIER Emmanuel et VILCOT Florian.
43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 13.06.25 Bulletin 25/24.	73 Titulaire(s) : COMPAGNIE GENERALE DES ETABLISSEMENTS MICHELIN Société en commandite par actions.
56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : Se reporter à la fin du présent fascicule	74 Mandataire(s) : Casalonga.
60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :	
Demande(s) d'extension :	

54 Pneumatique sans air pour véhicule extra-terrestre comprenant une bande de roulement en tissu tridimensionnel.

57 La présente invention a pour objet un pneumatique sans air pour un véhicule pouvant rouler dans un environnement extra-terrestre, à de très basses températures et sur des sols de diverses natures. Un tel pneumatique sans air comprend, radialement de l'intérieur vers l'extérieur, une structure porteuse, destinée à coopérer avec une jante, une bande de cisaillement et une bande de roulement (4).

Selon l'invention, la matériau constituant la bande de roulement (4) a un module de Young en traction E, mesuré à une température égale à 20°C, au moins égal à 1 GPa et au plus égal à 6 GPa, et, mesuré à une température égale à -196°C, au moins égal à 1.2 GPa et au plus égal à 9 GPa, et une contrainte maximale en traction Sm, mesurée à une température égale à 20°C, au moins égale à 25 MPa et au plus égale à 150 MPa, et, mesurée à une température égale à -196°C, au moins égale à 40 MPa et au plus égale à 260 MPa, ces caractéristiques mécaniques étant mesurées selon la norme ASTM D638 et la bande de roulement (4) est constituée exclusivement d'un tissu (T) tridimensionnel.

Figure pour l'abrégé: Fig 2



Description

Titre de l'invention : Pneumatique sans air pour véhicule extra-terrestre comprenant une bande de roulement en tissu tridimensionnel

Domaine technique de l'invention

[0001] La présente invention concerne le domaine du pneumatique sans air, destiné à équiper un véhicule d'exploration extra-terrestre, prévu pour se déplacer, par exemple, sur la lune ou sur la planète Mars, dans une ambiance soumise à de très fortes variations de températures, pouvant atteindre de très basses températures jusqu'à -243°C et de très hautes températures jusqu'à +130°C. Un tel gradient thermique est notamment mesuré au pôle Sud de la lune. Elle concerne plus particulièrement la bande de roulement d'un tel pneumatique sans air.

Etat de la technique antérieure

- [0002] Un pneumatique conventionnel, soumis à la pression interne d'un gaz de gonflage, généralement de l'air, ou un bandage plein classique ne sont pas adaptés à un tel usage, car les matériaux usuels à base de caoutchouc qui les constituent ont des propriétés mécaniques incompatibles avec une utilisation dans une ambiance pouvant atteindre de très basses températures, appelées également températures cryogéniques.
- [0003] Il est connu d'avoir, comme solution technique alternative à un pneumatique conventionnel, un pneumatique sans air, ou plus généralement un pneumatique sans gaz de gonflage, qui porte la charge grâce à des composants structurels et qui a des performances comparables à celles d'un pneumatique conventionnel. Un pneumatique sans air, monté sur un moyeu, ou une jante, est parfois appelé « roue élastique non pneumatique ».
- [0004] Un tel pneumatique sans air a été décrit, à titre d'exemples, dans les documents WO 2003/018332 – A1, FR 2 964 597 – B1, WO 2012/102932 – A1, WO 2018/101937 – A1, WO 2018/102303 – A1, WO 2018/102560 – A1, WO 2018/125186 – A1.
- [0005] Dans ce qui suit, la direction circonférentielle ou longitudinale désigne la direction de rotation du pneumatique, la direction axiale ou transversale désigne une direction parallèle à l'axe de rotation du pneumatique et la direction radiale désigne une direction perpendiculaire à l'axe de rotation du pneumatique.
- [0006] On entend par élément « intérieur », la partie plus proche de l'axe de rotation du pneumatique par rapport à un élément « extérieur ».
- [0007] Un pneumatique sans air comprend généralement, radialement de l'intérieur vers l'extérieur :
- [0008] - une structure porteuse, destinée à porter structurellement au moins en partie la

- charge et à coopérer avec une jante ou un moyeu ;
- [0009] - une bande de cisaillement, destinée à transmettre par cisaillement les efforts de roulage à la structure porteuse et à contribuer au moins en partie au port de la charge, et
 - [0010] - une bande de roulement, destinée à transmettre à la bande de cisaillement les efforts de roulage, à être usée et à garantir l'adhérence du pneumatique sur un sol.
 - [0011] La structure porteuse comprend, radialement de l'intérieur vers l'extérieur, des moyens de connexion avec une jante ou un moyeu, des éléments radiaux ou rayons, et des moyens de connexion avec la bande de cisaillement.
 - [0012] Toutefois, la structure porteuse ne délimite généralement pas une cavité interne étanche destinée à contenir un gaz sous pression, comme dans un pneumatique conventionnel. Par conséquent, un pneumatique sans air n'a pas besoin d'avoir une liaison étanche par rapport à une jante ou un moyeu.
 - [0013] La bande de cisaillement comprend, radialement de l'intérieur vers l'extérieur :
 - [0014] - une première membrane intérieure,
 - [0015] - une couche de cisaillement constituée par un ou plusieurs matériaux polymériques, et
 - [0016] - une deuxième membrane extérieure.
 - [0017] Dans l'exemple décrit, la première et la deuxième membrane ont un module d'élasticité en extension circonférentielle souvent sensiblement supérieur au module d'élasticité en cisaillement de la couche de cisaillement en matériau polymérique, de telle sorte que, sous la charge appliquée, les membranes ne s'allongent pas ou peu lors de la mise à plat du pneumatique en roulage. Le déplacement relatif des membranes l'une par rapport à l'autre se produit par cisaillement dans la couche de cisaillement. Par exemple, les membranes, respectivement intérieure et extérieure, comprennent des couches superposées de renforts enrobés dans un matériau polymérique.
 - [0018] La couche de cisaillement en matériau polymérique est constituée, à titre d'exemple, d'un matériau polymérique, tel qu'un caoutchouc naturel ou un caoutchouc synthétique, ou d'un polyuréthane. Typiquement, le matériau de la couche de cisaillement a un module de cisaillement au moins égal à 3 MPa et au plus égal à 20 MPa, ce qui permet une mise à plat facilitée de la bande de cisaillement sous charge.
 - [0019] Enfin, la bande de roulement, qui est le composant radialement extérieur du pneumatique, est le plus souvent constituée d'un matériau polymérique, tel qu'un caoutchouc naturel ou un caoutchouc synthétique.
 - [0020] La société Michelin North America a commercialisé, depuis plusieurs années, un ensemble monté, constitué d'un pneumatique sans air, tel que précédemment décrit, et d'une roue, sous l'appellation MICHELIN® TWEEL®. Cette solution technique comprend principalement une bande de roulement, une bande de cisaillement (en

anglais, « shear-band »), une structure porteuse, constituée de rayons (en anglais, « spokes ») hautement résistants en poly-résine et un moyeu constitué de deux pièces en acier renforcé.

[0021] Toutefois, dans des applications à très basses températures, les matériaux polymériques usuels, constitutifs d'un pneumatique sans air, sont incompatibles avec la plage de températures spécifiée.

[0022] Ainsi, les matériaux polymériques usuels, utilisés, en particulier, pour la bande de cisaillement, ont des niveaux de rigidités qui vont générer des pressions de contact élevées, impliquant un risque d'enfoncement du pneumatique dans un sol meuble, notamment comme sur la lune, et générer une résistance au roulement élevée, impliquant une forte consommation en énergie, pénalisante vis-à-vis de l'autonomie énergétique du véhicule extra-terrestre.

[0023] De plus, les matériaux polymériques usuels, tels qu'un caoutchouc naturel ou un caoutchouc synthétique, généralement constitutifs de la bande de roulement d'un pneumatique sans air, sont également incompatibles avec la plage de températures spécifiée.

[0024] Ainsi, il existe un besoin de remédier aux inconvénients précités.

Exposé de l'invention

[0025] Les inventeurs ont pour objectif de concevoir un pneumatique sans air pouvant rouler dans un environnement extra-terrestre, à de très basses températures, typiquement comprises dans l'intervalle $[-243^{\circ}\text{C} ; +130^{\circ}\text{C}]$, et sur des sols de diverses natures, pouvant être sableux ou caillouteux.

[0026] L'invention vise notamment à améliorer la motricité du pneumatique sans air tout en le protégeant des agressions du sol, en particulier par le choix d'une bande de roulement appropriée.

[0027] La présente invention a pour objet un pneumatique sans air pour un véhicule, comprenant, radialement de l'intérieur vers l'extérieur, une structure porteuse, destinée à coopérer avec une jante ou un moyeu d'une roue, une bande de cisaillement et une bande de roulement.

[0028] La bande de cisaillement comprend, radialement de l'intérieur vers l'extérieur, une membrane radialement intérieure, une structure de cisaillement et une membrane radialement extérieure.

[0029] La structure porteuse, la bande de cisaillement et la bande de roulement sont constituées chacune par au moins un matériau, de préférence thermoplastique, présentant les caractéristiques mécaniques suivantes, mesurées selon la norme ASTM D638 de l'ASTM (« American Society for Testing and Materials » : Société américaine pour les tests et les matériaux) International:

- un module de Young en traction E, mesuré à une température égale à 20°C, au moins égal à 1 GPa et au plus égal à 6 GPa, et, mesuré à une température égale à -196°C, au moins égal à 1.2 GPa et au plus égal à 9 GPa, et

- une contrainte maximale en traction S_m , mesurée à une température égale à 20°C, au moins égale à 25 Mpa et au plus égale à 150 Mpa, et, mesurée à une température égale à -196°C, au moins égale à 40 Mpa et au plus égale à 260 Mpa.

- [0030] La bande de roulement est constituée exclusivement d'un tissu tridimensionnel ou en trois dimensions.
- [0031] Un tel pneumatique sans air est destiné à équiper un véhicule extra-terrestre et est capable de résister à de forts gradients de température allant de -243°C à +130°C.
- [0032] Par « constituée exclusivement », on entend que le tissu n'est pas noyé dans une matrice.
- [0033] Par tissu en « trois dimensions » ou « tridimensionnel », on entend un tissu comprenant au moins deux membranes tricotées, par exemple en chaîne, qui ont été prolongées d'une troisième dimension, par exemple par des fils de liaison F.
- [0034] Le tissu tridimensionnel est utilisé ici dans une application particulière pour garantir une pression de contact très faible et améliorer la motricité du pneumatique.
- [0035] Pour permettre à un pneumatique sans air de rouler dans un environnement extra-terrestre pouvant varier entre de très basses températures et de très hautes températures, typiquement dans l'intervalle [-243°C ; 130°C], et sur des sols de diverses natures, pouvant être sableux ou caillouteux, la Demanderesse a sélectionné des matériaux ayant, de façon essentielle, un module de Young en traction E et une contrainte maximale en traction S_m compris dans des intervalles spécifiques à la fois à température ambiante, prise égale à 20°C, et à très basse température, prise égale à -196°C.
- [0036] Le module de Young en traction E et la contrainte maximale en traction S_m sont mesurées sur une courbe de traction « contrainte - allongement », établie à partir d'un essai de traction réalisé sur une éprouvette normalisée, conformément à la norme ASTM D638 (« Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics » : Méthode de test standard pour les propriétés en traction des plastiques), élaborée par l'ASTM (« American Society for Testing and Materials » : Société américaine pour les tests et les matériaux) International. L'éprouvette normalisée a une longueur égale à 84 mm et une épaisseur égale à 2 mm, et comprend une striction ayant une longueur égale à 25 mm et une largeur égale à 4 mm. La vitesse de traction appliquée à l'éprouvette est égale à 500 mm/mn. Le module de Young en traction E est un module tangent mesurée à faible déformation.
- [0037] Le module de Young en traction E conditionne les rigidités et la capacité de charge du pneumatique sans air, aux températures d'utilisation visées. La contrainte maximale en traction S_m conditionne l'endurance du pneumatique sans air, aux températures

d'utilisation visées.

- [0038] Par conséquent les inventeurs ont choisi des matériaux dont les caractéristiques mécaniques précitées permettent de garantir un compromis satisfaisant entre la capacité de charge et l'endurance requises pour le pneumatique sans air dans les conditions d'usage visées. Le pneumatique sans air doit être capable de porter une charge typiquement comprise entre 16 et 200 daN, et est destiné à être monté sur un véhicule pouvant se déplacer typiquement jusqu'à une vitesse maximale égale à 20 km/h.
- [0039] La bande de roulement selon l'invention permet de minimiser la pression de contact avec le sol en maximisant la surface de contact avec le sol, ce qui permet d'améliorer la motricité de pneumatique sans air sans le dégrader.
- [0040] Une telle bande de roulement a une pression de mise à plat, dans le contact avec le sol, comprise entre 0.05 bar et 0.3 bar, ce qui améliore encore la capacité de franchissement, donc la motricité ainsi que la consommation d'énergie.
- [0041] Enfin, une telle bande de roulement présente par ailleurs l'avantage d'être particulièrement légère par rapport aux bandes de roulement connues.
- [0042] Avantageusement, le tissu tridimensionnel formant la bande de roulement comprend, au moins deux membranes tricotées, à savoir une membrane tricotée interne et une membrane tricotée externe reliées entre elles radialement par une pluralité de fils de liaison. Chaque membrane tricotée comprend une surface interne et une surface externe, la surface interne de la membrane tricotée interne étant, par exemple, solidaire de la bande de cisaillement, notamment de la membrane radialement extérieure de celle-ci, et la surface externe de la membrane tricotée externe étant configurée pour être en contact avec la surface du sol.
- [0043] De préférence, la membrane tricotée interne et la membrane tricotée externe ont des structures différentes.
- [0044] Par exemple, la membrane tricotée externe comprend une pluralité d'alvéoles ou mailles, par exemple, régulièrement réparties circonférentiellement.
- [0045] Le taux de couverture de la membrane tricotée externe, défini comme le ratio entre la surface totale d'alvéoles et la surface de la membrane tricotée externe, est au moins égal à 20% et strictement inférieur à 100%, de préférence au moins égal à 80%.
- [0046] Ceci permet de maximiser la surface de contact de la surface externe de la membrane tricotée externe avec le sol et ainsi de minimiser la pression de contact.
- [0047] Par exemple, les alvéoles de la membrane tricotée externe sont ici des alvéoles ouvertes reliées entre elles par de la matière.
- [0048] Par exemple, la membrane tricotée interne comprend une pluralité d'alvéoles ou mailles, régulièrement réparties circonférentiellement.
- [0049] Les alvéoles de la membrane tricotée interne sont, par exemple, des alvéoles ouvertes et reliées entre elles par de la matière.

- [0050] De préférence, le taux de couverture de la membrane tricotée interne, défini comme le ratio entre la surface totale d'alvéoles et la surface de la membrane tricotée interne, est inférieur au taux de couverture de la membrane tricotée externe.
- [0051] Par exemple, le taux de couverture de la membrane tricotée interne est au moins égal à 20% et strictement inférieur à 100%.
- [0052] Par exemple, et de manière nullement limitative, les alvéoles de la membrane tricotée interne et de la membrane tricotée externe se superposent dans la direction radiale.
- [0053] En variante, on pourrait prévoir que les alvéoles de la membrane tricotée interne soient décalées en quinconce par rapport aux alvéoles de la membrane tricotée externe.
- [0054] Par exemple, les fils de liaison, reliant la membrane tricotée interne et la membrane tricotée externe, ont chacun un diamètre compris entre 0.05 mm et 2 mm et une distance radiale comprise entre 0.05 mm et 2 mm.
- [0055] Par exemple, l'épaisseur de la membrane tricotée interne est comprise entre 0.15 mm et 3 mm.
- [0056] Par exemple, l'épaisseur de la membrane tricotée externe est comprise entre 0.15 mm et 3 mm.
- [0057] De préférence, le tissu tridimensionnel, formant la bande de roulement, a une épaisseur totale comprise entre 3 mm et 20 mm. L'épaisseur totale est mesurée entre la surface interne de la membrane tricotée interne et la surface externe de la membrane tricotée externe.
- [0058] De préférence, le tissu tridimensionnel formant la bande de roulement est constitué par un matériau polymérique thermoplastique compris dans le groupe comprenant du polyétheréthercétone (PEEK), du polyetherimide (PEI), du polyimide (PI) et du polyéthercétonecétone, (PEKK).
- [0059] Un polyétheréthercétone (PEEK) est un matériau polymérique thermoplastique appartenant à la famille des polyaryléthercétone (PAEK). Un polyétheréthercétone, tel que, par exemple, les matériaux Victrex CT100™ et Victrex 450G™, commercialisés par la société Victrex®, ont les caractéristiques mécaniques requises, en particulier aux températures cryogéniques.
- [0060] Un polyimide, tel que, par exemple, le matériau Aurum PL500A™, a d'excellentes caractéristiques mécaniques aux températures cryogéniques, mais est plus difficile à mettre en œuvre qu'un polyétheréthercétone, tel que le matériau Victrex CT100™.
- [0061] Un polyetherimide tel que, par exemple, le matériau Ultem 1010™, a des propriétés mécaniques comparables à celles d'un polyétheréthercétone, tel que le matériau Victrex CT100™ avec toutefois un plus faible allongement à rupture. Il présente l'avantage d'être plus économique.
- [0062] Dans le contexte de la présente invention, les inventeurs ont mis en évidence, de façon surprenante, qu'un tel matériau polymérique thermoplastique hautes per-

formances permet également d'atteindre un compromis satisfaisant entre une rigidité de structure élevée, une endurance élevée et une masse faible du pneumatique sans air, à de très basses températures cryogéniques, comme le montrent les mesures réalisées à -196°C.

[0063] De préférence, le tissu tridimensionnel formant la bande de roulement présente une pression de compression définie selon la norme DIN EN ISO 3386-1 comprise entre la pression de contact du pneumatique augmentée de 1kPa et la pression de contact du pneumatique augmentée de 10kPa.

[0064] Ceci permet d'éviter que le tissu ne collapse sous la pression de contact imposée au pneumatique

[0065] Selon un mode de réalisation préféré, la structure porteuse, la bande de cisaillement et la bande de roulement sont constituées chacune par le même matériau. Un matériau identique pour l'ensemble des constituants d'un pneumatique sans air simplifie la fabrication et permet une adhésion facilitée entre les différents constituants.

[0066] Par exemple, la structure de cisaillement est constituée par une pluralité d'éléments de cisaillement répartis circonférentiellement. Une telle structure de cisaillement discrète présente l'avantage d'être plus légère qu'une structure de cisaillement continue. De plus ses rigidités peuvent être plus finement optimisées.

[0067] Selon un second aspect, l'invention concerne une roue comprenant un pneumatique sans air tel que décrit précédemment monté sur une jante.

Brève description des dessins

[0068] D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :

[0069] [Fig.1]

représente une vue d'ensemble en perspective d'une roue comprenant un pneumatique sans air selon un mode de réalisation de l'invention ;

[0070] [Fig.2]

illustre en détail la bande de roulement du pneumatique de la [Fig.1] selon un mode de réalisation de l'invention ;

[0071] [Fig.3]

représente en détail le tissu tridimensionnel formant la bande de roulement de la [Fig.2] ; et

[0072] [Fig.4]

représente un diagramme des résultats d'une expérience avec une éprouvette contenant notamment le tissu tridimensionnel selon la [Fig.3].

[0073] **Exposé détaillé d'au moins un mode de réalisation**

- [0074] Dans la description qui suit, les termes « circonférentielle », « axiale » et « radiale » sont définis par rapport à l'axe de rotation X1-X1 du pneumatique 1.
- [0075] La direction « circonférentielle » désigne une direction d'un plan perpendiculaire à l'axe de rotation X1-X1 tangente à la bande de roulement du pneumatique 1, la direction « axiale » est la direction de l'axe de rotation X1-X1 du pneumatique 1 et une direction « radiale » désigne une direction perpendiculaire à l'axe de rotation X1-X1 du pneumatique 1.
- [0076] La [Fig.1] est une vue d'ensemble en perspective d'un ensemble monté ou roue 10 comprenant une jante 100 et un pneumatique sans air 1 monté sur ladite jante 100.
- [0077] Par « jante », on entend une structure de liaison avec le véhicule et de support central du pneumatique 1.
- [0078] Le pneumatique sans air 1 est destiné à équiper un véhicule extra-terrestre et est capable de résister à de forts gradients de température allant de -243°C à +130°C.
- [0079] Le pneumatique sans air 1 comprend, radialement de l'intérieur vers l'extérieur, une structure porteuse 2, destinée à coopérer avec la jante 100, une bande de cisaillement 3 solidaire de la structure porteuse 2 et une bande de roulement 4 solidaire de la bande de cisaillement 3.
- [0080] La structure porteuse 2 est constituée, ici, d'une pluralité de rayons 21 régulièrement répartis circonférentiellement.
- [0081] De manière nullement limitative, les rayons 21 comprennent chacun ici une extrémité interne 21a solidaire de la jante 100, par exemple par des moyens de fixation (non représentés), tel que des moyens de visseries (vis/écrous) ou par rivets (non représentés), une portion concave 21b et une extrémité externe 21c solidaire de la bande de cisaillement 3 par des moyens de visseries ou par rivets (non représentés).
- [0082] A titre d'exemple nullement limitatif, lesdits moyens de fixation pourraient être configurés pour fixer à la fois un rayon 21 du pneumatique 1 et la jante 100.
- [0083] La bande de cisaillement 3 comprend, radialement de l'intérieur vers l'extérieur, une membrane radialement intérieure 31, solidaire de la structure porteuse 2, une structure de cisaillement 32 et une membrane radialement extérieure 33.
- [0084] Tel qu'illustré, la structure de cisaillement 32 est constituée par une pluralité d'éléments de cisaillement 32a, ici régulièrement répartis circonférentiellement entre la membrane radialement intérieure 31 et la membrane radialement extérieure 33.
- [0085] De manière nullement limitative, chaque élément de cisaillement 32a comprend deux courbures opposées.
- [0086] La structure porteuse 2 et la bande de cisaillement 3 sont constituées chacune par un matériau polymérique thermoplastique, dit à hautes performances.
- [0087] Le matériau constituant au moins la structure porteuse 2 et la bande de cisaillement 3 présentent les caractéristiques mécaniques suivantes, mesurées selon la norme ASTM

D638 de l'ASTM (« American Society for Testing and Materials » : Société américaine pour les tests et les matériaux) International:

- un module de Young en traction E, mesuré à une température égale à 20°C, au moins égal à 1 GPa et au plus égal à 6 GPa, et, mesuré à une température égale à -196°C, au moins égal à 1.2 GPa et au plus égal à 9 GPa, et
- une contrainte maximale en traction Sm, mesurée à une température égale à 20°C, au moins égale à 25 MPa et au plus égale à 150 MPa, et, mesurée à une température égale à -196°C, au moins égale à 40 MPa et au plus égale à 260 MPa.

Bande de roulement

- [0088] La bande de roulement 4 est constituée exclusivement par un tissu T tridimensionnel.
- [0089] Par « constituée exclusivement », on entend que le tissu n'est pas noyé dans une matrice.
- [0090] Tel qu'illustré sur la [Fig.3], le tissu T tridimensionnel comprend, ici, deux membranes tricotées, à savoir une membrane tricotée interne M1 et une membrane tricotée externe M2 et une pluralité de fils de liaison F reliant radialement les deux membranes tricotées M1, M2.
- [0091] Par tissu en « trois dimensions » ou « tridimensionnel », on entend un tissu comprenant au moins deux membranes tricotées, par exemple en chaîne, qui ont été prolongées d'une troisième dimension, ici par les fils de liaison F.
- [0092] Chaque membrane tricotée M1, M2 comprend une surface interne M1a, M2a et une surface externe M1b, M2b.
- [0093] La surface interne M1a de la membrane tricotée interne M1 est solidaire de la bande de cisaillement 3, notamment de la membrane radialement extérieure 33 de ladite bande de cisaillement 3.
- [0094] La surface externe M2b de la membrane tricotée externe M2 est configurée pour coopérer avec la surface du sol.
- [0095] Ainsi, la membrane tricotée interne M1 et la membrane tricotée externe M2 ont, de préférence, des structures différentes.
- [0096] La membrane tricotée interne M1 comprend une pluralité d'alvéoles (non référencées) ou mailles régulièrement réparties circonférentiellement.
- [0097] Les alvéoles de la membrane tricotée interne M1 sont ici des alvéoles ouvertes reliées entre elles par de la matière.
- [0098] La membrane tricotée externe M2 comprend une pluralité d'alvéoles (non référencées) ou mailles régulièrement réparties circonférentiellement.
- [0099] Les alvéoles de la membrane tricotée externe M2 sont ici des alvéoles ouvertes reliées entre elles par de la matière.
- [0100] De préférence, le taux de couverture de la membrane tricotée externe M2, défini comme le ratio entre la surface totale d'alvéoles et la surface de la membrane tricotée

externe M2, est au moins égal à 20% et strictement inférieur à 100%, de préférence au moins égal à 80% afin de maximiser la surface de contact de la surface externe M2b de la membrane tricotée externe M2 avec le sol et ainsi minimiser la pression de contact.

- [0101] Le taux de couverture de la membrane tricotée interne M1, défini comme le ratio entre la surface totale d'alvéoles et la surface de la membrane tricotée interne M1, est inférieur au taux de couverture de la membrane tricotée externe M2 défini comme le ratio entre la surface totale d'alvéoles et la surface de la membrane tricotée externe M2.
- [0102] Par exemple, le taux de couverture de la membrane tricotée interne M1 est au moins égal à 20% et strictement inférieur à 100%.
- [0103] Tel qu'illustré sur la [Fig.3] et de manière nullement limitative, les alvéoles de la membrane tricotée interne M1 et de la membrane tricotée externe M2 se superposent dans la direction radiale.
- [0104] En variante, on pourrait prévoir que les alvéoles de la membrane interne tricotée M1 soient décalées en quinconce par rapport aux alvéoles de la membrane tricotée externe M2.
- [0105] Les fils de liaison F, reliant la membrane tricotée interne M1 et la membrane tricotée externe M2, ont chacun un diamètre compris entre 0.05 mm et 2 mm et une distance radiale comprise entre 0.05 mm et 2 mm.
- [0106] L'épaisseur de la membrane tricotée interne M1 est comprise entre 0.15 mm et 3 mm.
- [0107] L'épaisseur de la membrane tricotée externe M2 est comprise entre 0.15 mm et 3 mm.
- [0108] Le tissu T tridimensionnel, formant la bande de roulement 4, a une épaisseur totale comprise entre 3 mm et 20 mm.
- [0109] En variante, on pourrait prévoir plus de deux membranes tricotées, reliées radialement entre elles par des fils de liaison, par exemple au moins trois membranes tricotées, formant un nombre de couches de tissu superposées supérieur à un.
- [0110] Tel qu'illustré sur la [Fig.2], chaque membrane tricotée interne M1 et externe M2 est constituée par une bande de tissu unique.
- [0111] En variante, on pourrait prévoir que l'une et/ou l'autre des membranes tricotées respectivement interne M1 et externe M2 est constituée par une juxtaposition de bandes de tissu.
- [0112] Dans ce cas la bande de roulement 4 est ainsi réalisée en plusieurs parties, ce qui permet aisément de remplacer un élément en cas d'endommagement.
- [0113] Le tissu T tridimensionnel formant la bande de roulement 4 est constitué par un matériau polymérique thermoplastique compris dans le groupe comprenant du poly-étheréthercétone (PEEK), du polyetherimide (PEI), du polyimide (PI) et du polyéther-

cétonecétone, (PEKK).

- [0114] Le tissu T tridimensionnel formant la bande de roulement 4 présente les caractéristiques mécaniques suivantes, mesurées selon la norme ASTM D638 de l'ASTM (« American Society for Testing and Materials » : Société américaine pour les tests et les matériaux) International:
 - un module de Young en traction E, mesuré à une température égale à 20°C, au moins égal à 1 GPa et au plus égal à 6 GPa, et, mesuré à une température égale à -196°C, au moins égal à 1.2 GPa et au plus égal à 9 GPa, et
 - une contrainte maximale en traction Sm, mesurée à une température égale à 20°C, au moins égale à 25 MPa et au plus égale à 150 MPa, et, mesurée à une température égale à -196°C, au moins égale à 40 MPa et au plus égale à 260 MPa.
- [0115] Le tissu T tridimensionnel formant la bande de roulement 4 présente une pression de compression définie selon la norme DIN EN ISO 3386-1 comprise entre la pression de contact du pneumatique augmentée de 1 kPa et la pression de contact du pneumatique augmentée de 10kPa.
- [0116] Ceci permet d'éviter que le tissu T ne collapse pas sous la pression de contact imposée au pneumatique.
- [0117] Le tissu T tridimensionnel formant la bande de roulement 4 est assemblé, par exemple, par collage sur la bande de cisaillement 3. Le collage est, de préférence, réalisé avec une colle à basse viscosité.
- [0118] On pourrait également prévoir d'autres solutions d'assemblage, par exemple, démontables.
- [0119] Le tissu T tridimensionnel est utilisé ici dans une application particulière pour garantir une pression de contact très faible et améliorer la motricité du pneumatique 1 et notamment de la roue 10.
- [0120] Le matériau Victrex CT100™, de type PEEK, est considéré comme particulièrement intéressant pour la réalisation d'un pneumatique sans air, destiné à équiper un véhicule d'exploration extra-terrestre, prévu pour se déplacer, par exemple, sur la lune ou sur la planète Mars, jusqu'à de très basses températures pouvant atteindre, à titre d'exemple, -243°C. Ce matériau a l'avantage d'avoir à la fois un module de Young en traction E élevé (7 GPa), garantissant une rigidité satisfaisante, et une contrainte maximale en traction Sm élevée (252 MPa), garantissant une endurance satisfaisante, à très basse température (-196°C).
- [0121] La Demanderesse a réalisé un test de motricité avec trois éprouvettes : une éprouvette A lisse, une éprouvette B présentant un motif en quinconce et une éprouvette C formée par le tissu T tridimensionnel selon l'invention.
- [0122] Chaque éprouvette mesure 6 mm d'épaisseur.
- [0123] On pose chaque éprouvette A, B, C dans un bac contenant du sable ou de la

régolithe.

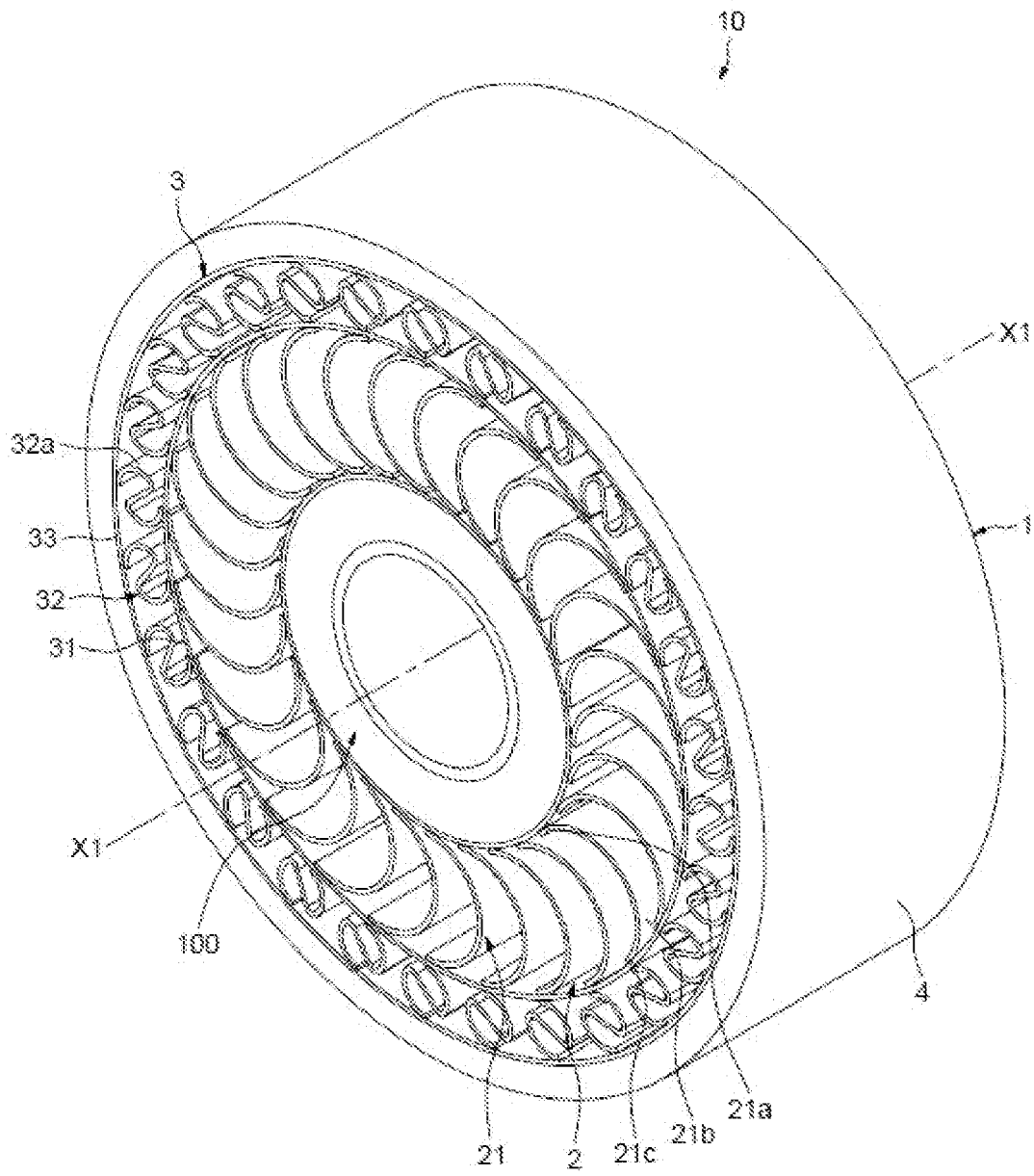
- [0124] On applique une charge F_z selon l'axe vertical Z sur chaque éprouvette, puis on met en mouvement l'éprouvette chargée selon l'axe longitudinal X perpendiculaire à l'axe vertical Z. La charge F_z est ici égale à 15 daN.
- [0125] L'expérience est réalisée dans une atmosphère ambiante, et à une température égale à 20 °C.
- [0126] La courbe illustrée en [Fig.4] représente les résultats pour chaque éprouvette A, B, C du coefficient de frottement $\mu = F_x/F_z$ (en ordonnées) par rapport au déplacement dx de l'éprouvette, selon l'axe longitudinal X, en mm (en abscisses).
- [0127] On constate que l'éprouvette C en tissu T tridimensionnel permet d'obtenir un coefficient de frottement supérieur à l'éprouvette A lisse et à l'éprouvette B pour des déplacements allant jusqu'à 35 mm.
- [0128] Par ailleurs, le tissu T tridimensionnel a pour avantage de ne pas modifier la mise à plat du pneumatique, contrairement à l'éprouvette B.
- [0129] Grace à la structure particulière de la bande de roulement du pneumatique sans air, formée exclusivement en tissu tridimensionnel, la pression de contact avec le sol est minimisée en maximisant la surface de contact avec le sol, ce qui permet d'améliorer la motricité de pneumatique sans air sans le dégrader.
- [0130] Une telle bande de roulement favorise par ailleurs la mise à plat du pneumatique sur le sol.
- [0131] Enfin, une telle bande de roulement présente par ailleurs l'avantage d'être particulièrement légère par rapport aux bandes de roulement connues.

Revendications

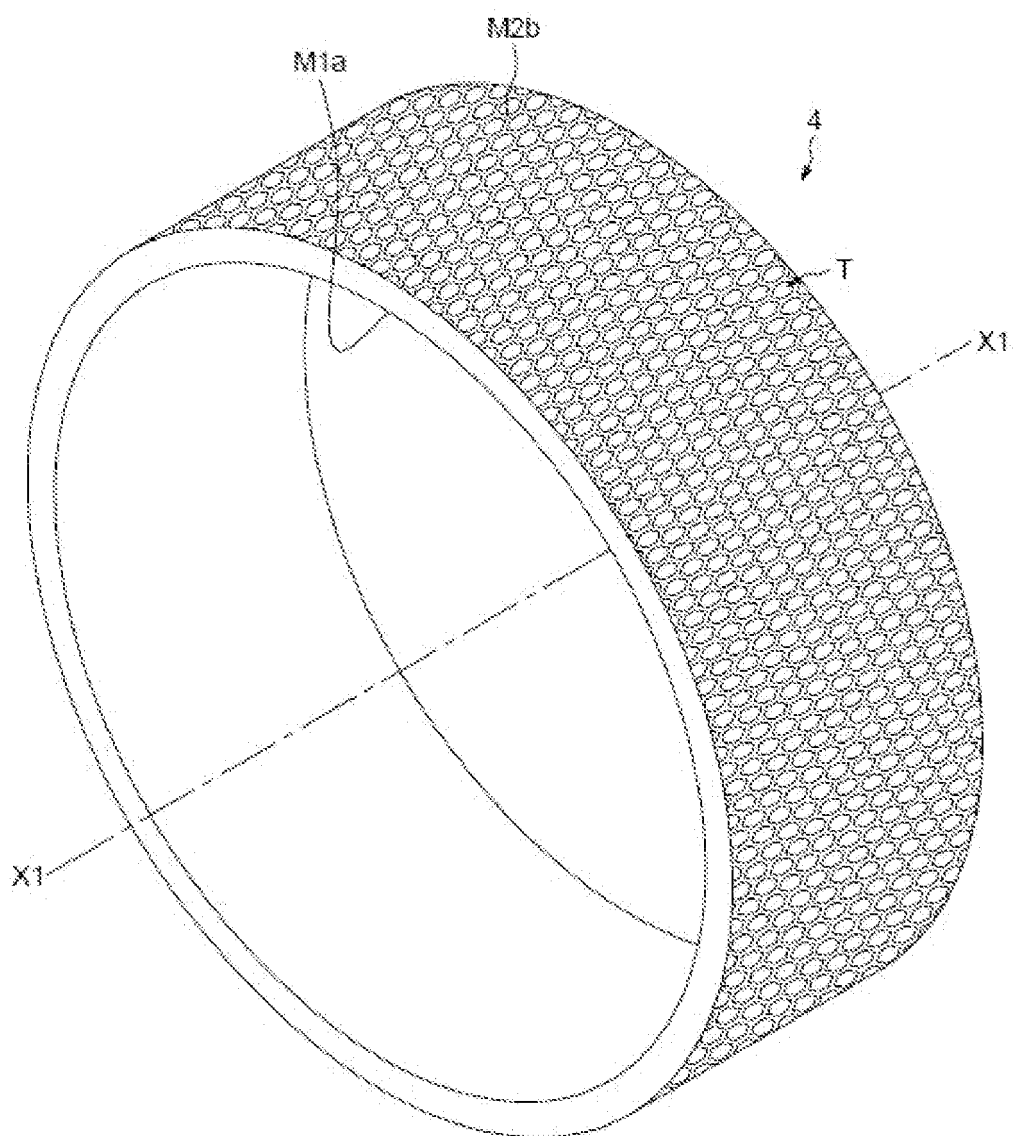
- [Revendication 1] Pneumatique sans air (1) pour un véhicule, comprenant, radialement de l'intérieur vers l'extérieur, une structure porteuse (2), destinée à coopérer avec une jante (100) d'une roue (10), une bande de cisaillement (3) et une bande de roulement (4), la bande de cisaillement (3) comprenant, radialement de l'intérieur vers l'extérieur, une membrane radialement intérieure (31), une structure de cisaillement (32) et une membrane radialement extérieure (33), **caractérisé en ce que** la structure porteuse (2), la bande de cisaillement (3) et la bande de roulement (4) sont constituées chacune par au moins un matériau, de préférence thermoplastique, présentant les caractéristiques mécaniques suivantes, mesurées selon la norme ASTM D638 de l'ASTM (« American Society for Testing and Materials » : Société américaine pour les tests et les matériaux) International:
- un module de Young en traction E, mesuré à une température égale à 20°C, au moins égal à 1 GPa et au plus égal à 6 GPa, et, mesuré à une température égale à -196°C, au moins égal à 1.2 GPa et au plus égal à 9 GPa, et
 - une contrainte maximale en traction Sm, mesurée à une température égale à 20°C, au moins égale à 25 MPa et au plus égale à 150 MPa, et, mesurée à une température égale à -196°C, au moins égale à 40 MPa et au plus égale à 260 MPa, **et en ce que** la bande de roulement (4) est constituée exclusivement d'un tissu (T) tridimensionnel.
- [Revendication 2] Pneumatique (1) selon la revendication 1, **dans lequel** le tissu (T) tridimensionnel formant la bande de roulement (4) comprend, au moins deux membranes tricotées (M1, M2), à savoir une membrane tricotée interne (M1) et une membrane tricotée externe (M2) reliées entre elles radialement par une pluralité de fils de liaison (F), chaque membrane tricotée (M1, M2) comprenant une surface interne (M1a, M2a) et une surface externe (M1b, M2b), la surface interne (M1a) de la membrane tricotée interne (M1) étant solidaire de la bande de cisaillement (3), et la surface externe (M2b) de la membrane tricotée externe (M2) étant configurée pour être en contact avec la surface du sol.
- [Revendication 3] Pneumatique (1) selon la revendication 2, **dans lequel** la membrane tricotée interne (M1) et la membrane tricotée externe (M2) ont des structures différentes.
- [Revendication 4] Pneumatique (1) selon la revendication 2 ou 3, **dans lequel** la

- membrane tricotée externe (M2) comprend une pluralité d'alvéoles réparties circonférentiellement.
- [Revendication 5] Pneumatique (1) selon l'une quelconques des revendications 2 à 4, **dans lequel** le taux de couverture de la membrane tricotée externe (M2), défini comme le ratio entre la surface totale d'alvéoles et la surface de la membrane tricotée externe (M2), est au moins égal à 20% et strictement inférieur à 100%, de préférence au moins égal à 80%.
- [Revendication 6] Pneumatique (1) selon la revendication 5, **dans lequel** le taux de couverture de la membrane tricotée interne (M1), défini comme le ratio entre la surface totale d'alvéoles et la surface de la membrane tricotée interne (M1), est inférieur au taux de couverture de la membrane tricotée externe (M2).
- [Revendication 7] Pneumatique (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, **dans lequel** le tissu (T) tridimensionnel formant la bande de roulement (4) a une épaisseur totale au moins égale à 3 mm et au plus égale à 20 mm.
- [Revendication 8] Pneumatique (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, **dans lequel** le tissu (T) tridimensionnel formant la bande de roulement (4) est constitué par un matériau polymérique thermoplastique compris dans le groupe comprenant du polyétheréthercétone, (PEEK), du polyetherimide (PEI), du polyimide (PI) et du polyéthercétonecétone, (PEKK).
- [Revendication 9] Pneumatique (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, **dans lequel** le tissu (T) tridimensionnel formant la bande de roulement (4) a une pression de compression définie selon la norme DIN EN ISO 3386-1 comprise entre la pression de contact du pneumatique augmentée de 1kPa et la pression de contact du pneumatique augmentée de 10kPa.
- [Revendication 10] Pneumatique (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, **dans lequel** la structure porteuse (2), la bande de cisaillement (3) et la bande de roulement (4) sont constituées chacune par le même matériau.
- [Revendication 11] Pneumatique sans air (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes, **dans lequel** la structure de cisaillement (32) est constituée par une pluralité d'éléments de cisaillement (32a) répartis circonférentiellement.
- [Revendication 12] Roue (10) comprenant un pneumatique sans air (1) selon l'une quelconque des revendications précédentes monté sur une jante (100).

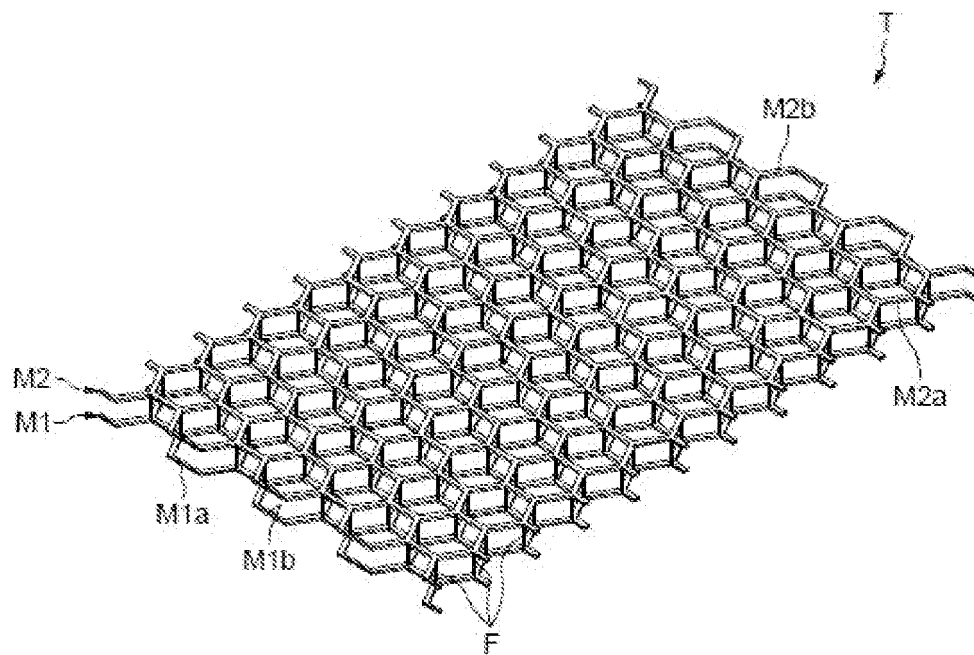
[Fig. 1]



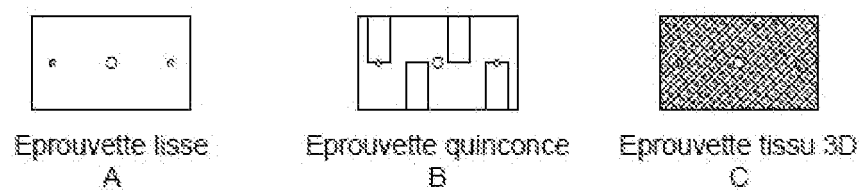
[Fig. 2]



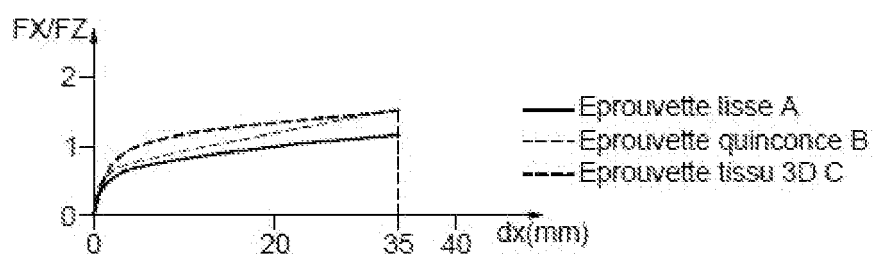
[Fig. 3]



[Fig. 4]



FX/FZ en fonction du déplacement dx de l'éprouvette.



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la rechercheN° d'enregistrement
nationalFA 924991
FR 2313795

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		
A	FR 3 130 201 A1 (MICHELIN & CIE [FR]) 16 juin 2023 (2023-06-16) * alinéa [0046]; revendications 1-20; figures 1-5 *	1-12	B60C 7/00
A	WO 2009/033620 A1 (MICHELIN SOC TECH [FR]; MICHELIN RECH TECH [CH] ET AL.) 19 mars 2009 (2009-03-19) * page 17, lignes 17-20; revendications 1-20; figures 1-8 *	1-12	
A	US 2020/114687 A1 (THOMPSON RONALD H [US]) 16 avril 2020 (2020-04-16) * alinéa [0142]; revendications 1-35; figures 1-19 *	1-12	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			B60C
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
27 mai 2024		Carneiro, Joaquim	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		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	
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			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2313795 FA 924991

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 **27 - 05 - 2024**
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
FR 3130201 A1	16-06-2023	FR 3130201 A1	16-06-2023
		WO 2023110657 A1	22-06-2023

WO 2009033620 A1	19-03-2009	FR 2921013 A1	20-03-2009
		US 2010307653 A1	09-12-2010
		WO 2009033620 A1	19-03-2009

US 2020114687 A1	16-04-2020	CA 3067053 A1	20-12-2018
		EP 3638515 A1	22-04-2020
		US 2020114687 A1	16-04-2020
		WO 2018227276 A1	20-12-2018
