(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** ***3 131 359***
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **21 14596**

(51) Int Cl[8] : ***F 17 C 1/12*** *(2022.01), F 17 C 1/04, B 64 C 3/34, B 64 D 37/02*

(12) **BREVET D'INVENTION** **B1**

(54) RÉSERVOIR CRYOGENIQUE EMBARQUÉ LÉGER DE FORME QUELCONQUE OPTIMISÉ STRUCTURELLEMENT.

(22) **Date de dépôt :** 28.12.21.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 30.06.23 Bulletin 23/26.

(45) **Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention :** 26.07.24 Bulletin 24/30.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche :**

Se reporter à la fin du présent fascicule

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

◯ **Demande(s) d'extension :**

(71) **Demandeur(s) :** *SCHULZ Jean Michel* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** SCHULZ Romain, SCHULZ Jean Michel et Schulz Eric.

(73) **Titulaire(s) :** SCHULZ Jean Michel.

(74) **Mandataire(s) :**

FR 3 131 359 - B1

Description

Titre de l'invention : RÉSERVOIR CRYOGENIQUE EMBARQUÉ LÉGER DE FORME QUELCONQUE OPTIMISÉ STRUCTURELLEMENT

[0001] La présente invention concerne un dispositif de réservoir léger de forme quelconque pour un ou des fluides cryogéniques. La problématique des réservoirs cryogéniques consiste à trouver un compromis entre la sécurité, la performance thermique, le poids, la fiabilité notamment mécanique et les coûts d'achats, de montage et d'entretien de l'installation. Les technologies actuelles s'agencent autour d'un réservoir interne isolé contenant le fluide cryogénique, et contenu dans une enveloppe extérieure sous un vide poussé. Le dimensionnement de l'enveloppe extérieure, également appelée « enveloppe à vide », est particulièrement difficile, car soumis à une dépression. En effet, la dépression interne de l'enveloppe provoque des contraintes de compression et de cisaillement, et des déformations de flambage et d'écrasement. Ces phénomènes souvent instables sont d'autant plus critiques que l'enveloppe est élancée, non-circulaire, et de faible épaisseur.

[0002] Pour diminuer ces contraintes les réservoirs sont généralement cylindriques avec une géométrie assez précise et relativement épais ce qui pénalise la masse du réservoir. Pour les mêmes raisons, les grandes surfaces planes sont proscrites, ce qui contrarie la réalisation de réservoirs plats qui pourraient plus facilement s'intégrer dans des espaces exigus. Par ailleurs les matériaux composites qui constituent une grande capacité à diminuer la masse structurale des réservoirs, résistent bien aux contraintes de traction, mais relativement mal aux contraintes de compression et de cisaillement. L'ajout de raidisseurs dans la structure pénalise soit le volume utile du réservoir, soit son isolation thermique, soit les deux. L'étape de l'isolation du réservoir interne par de la « superisolation » est délicate et coûteuse en temps de fabrication et de mise sous vide.

[0003] L'innovation consiste donc à créer un réservoir cryogénique dont le mode de chargement mécanique de l'enveloppe extérieure ne sera pas de la compression et du cisaillement élevé, mais une diminution des contraintes, voire même la transformation en une contrainte principale en traction. Comme le montre la [Fig.1], la présente invention est constituée d'un réservoir interne (1) étanche à l'intérieur duquel est stocké le fluide cryogénique à pression ambiante ou de préférence en surpression, et contenue dans une enveloppe extérieure (2). L'espace entre le réservoir interne (1) et l'enveloppe extérieure (2) est rempli par des sphères ou des microsphères creuses (3) sous contraintes mécaniques, et mis sous vide. Ces sphères ou microsphères

creuses, dont le diamètre moyen peut varier de quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres, peuvent être réalisées en verre, en matière polymère ou céramique, en carbone voir à base de matériaux métalliques. Elles sont éventuellement revêtues par un ou des traitements isolants et/ou aux pouvoirs rayonnants. Les sphères ou microsphères creuses (3) jouent simultanément un rôle structural et d'isolation thermique.

[0004] Le vide entre les sphères ou microsphères creuses (3) sera soit un vide scellé ou un vide dynamique. Dans le cas d'un vide dynamique, le dispositif disposera de son propre circuit de pompage (10) de l'enveloppe extérieure (2). Comme dans toutes les installations nécessitant une mise sous un vide, la propreté de l'ensemble des éléments internes sera essentielle, notamment les sphères ou microsphères creuses qui pourront être lavées et étuvées avant montage. Des composants dessiccateurs pourront être introduit dans l'enveloppe extérieure (2), pour éliminer l'humidité résiduelle et les éventuels produits de dégazage. Les techniques traditionnelles de chauffage autour de 100°C pour faciliter le dégazage des matériaux internes pourront être utilisées et les températures de chauffage même augmenter dans le cas de sphères ou de microsphères creuses en verre. Des capteurs de pression et de présence des molécules du ou des fluides cryogéniques permettent de s'affranchir d'éventuelles fuites du réservoir interne (1) ou de l'enveloppe extérieure (2).

[0005] Le réservoir interne (1) est constitué d'une structure rigide ou d'un liner interne (4). Par liner il faut entendre ici, une structure étanche à faible rigidité, d'une certaine souplesse ou extensibilité dans un matériau élastique et/ou malléable et de faible épaisseur, offrant peu de résistance à la pression et capable de se déformer sans se déchirer. Le liner peut être métallique, textile, plastique ou sur la base de tous matériaux ou assemblage de multimatériaux. Le liner peut se présenter sous forme d'une poche ou d'une coque autoportante, obtenu par soudage, formage, thermoformage, moulage, rotomoulage, infusion, drapage ou tout autre procédé, et peut contenir des raidisseurs pour rigidifier ou pour limiter les déformations de tout ou partie de la structure du réservoir interne (1). Sous l'effet de la pression interne du fluide cryogénique et de la dépression dans l'interstice entre l'enveloppe extérieure (2) et le réservoir interne (1), la structure rigide ou le liner interne se déforme, gonfle légèrement et met les sphères ou microsphères creuses (3) sous contraintes qui se plaquent contre l'enveloppe externe (2). Cette dernière subit donc simultanément sur sa face interne la dépression du vide dans l'interstice et la poussée des sphères ou microsphères creuses sous contraintes, ce qui a pour conséquence de diminuer la contrainte dans l'enveloppe extérieure (2). Si la somme de la pression des sphères ou microsphères moins la dépression dans l'interstice, est supérieure à la pression ambiante à l'extérieure de l'enveloppe extérieure (2), cette dernière, bien

que sous vide, subit un mode de chargement de type traction et une déformation en extension, comme s'il s'agissait d'un réservoir sous une faible pression. La structure de l'enveloppe extérieure (2) plus résistante pour ce type de chargement, peut donc être allégée au regard des technologies traditionnelles et leurs modes de charges et de flambage. L'enveloppe extérieure (2) peut être réalisée dans tous types de matériaux, mais le concepteur pourra par ce dispositif, tirer pleinement profit des excellentes caractéristiques en traction des matériaux composites et tout particulièrement des fibres de carbone.

[0006] Associé à un réservoir interne (1) peu épais ou composé d'un simple liner interne de faible épaisseur, le gain de masse d'un tel réservoir est conséquent, malgré l'utilisation de sphères ou microsphères creuses comme isolant dont la densité est particulièrement faible. Pour optimiser la masse du réservoir cryogénique, des renforts pourront être ajoutés sur l'enveloppe extérieure (2) et/ou sur le réservoir interne (1). Le dispositif pourra disposer d'un ensemble de piquages, de pompes, de vannes, de filtres, de soupapes, d'évents, de sondes et/ou de capteurs nécessaires au fonctionnement, à la surveillance et à l'entretien du réservoir cryogénique, ainsi qu'un circuit d'alimentation (4).

[0007] Pour augmenter la sécurité en cas de fuite du fluide cryogénique au travers du réservoir interne (1), l'enveloppe extérieure (2) pourra comprendre également un liner étanche (5) sur sa face interne. De même, pour améliorer l'isolation du réservoir et particulièrement en cas de dysfonctionnement et de rupture de vide, l'enveloppe extérieure (2) pourra comprendre un matériau isolant de type « foamglas » sur sa partie externe. En ultime recours, le réservoir interne (1) sera équipé d'un système de décharge et de purge (6) qui permettra d'éviter une trop forte pression et l'évacuation du fluide cryogénique.

[0008] Lors du remplissage du fluide cryogénique, la mise en froid provoque une rétractation du réservoir interne (1) et donc une augmentation du volume de l'interstice entre l'enveloppe extérieure (2) et le réservoir interne (1) et par conséquent une diminution de la pression des sphères ou microsphères creuses (3) sur l'enveloppe extérieure (2). Pour compenser cette perte de pression, le dispositif prévoit un système de type vase d'expansion (7) qui permet de régler et de compenser cette pression en ajoutant des sphères ou microsphères creuses (3). Ce ou ces vases d'expansion (7) permettent également d'amortir ou de compenser l'éventuel endommagement d'une partie des sphères ou microsphères creuses lors d'un choc ou d'une forte accélération accidentelle ou de vibrations internes ou externes au réservoir. Le vase d'expansion est également mis sous vide et comprend une réserve de sphères ou microsphères creuses associée à un système mécanique de mise sous contraintes des sphères ou microsphères, capable de les transférer vers l'interstice entre le réservoir interne (1)

et l'enveloppe externe (2). In fine, c'est le ou les vases d'expansion qui régulent et règlent la contrainte de l'enveloppe extérieure à un faible niveau en générant le niveau de contrainte dans les sphères ou microsphères creuses.

[0009] Dans la plupart des cas, le réservoir interne (1) est autoporté par les sphères ou microsphères creuses. Son centrage par rapport à l'enveloppe externe (2) sera réalisé pendant la fabrication. Pour garantir sa géométrie et son intégrité, une mise sous une certaine pression pendant ou à partir du remplissage des sphères ou microsphères creuses peut être nécessaire. Dans le cas de réservoirs élancés et verticaux ou pour des réservoirs embarqués soumis à de fortes accélérations ou des vibrations importantes, des systèmes de supportages classiques peuvent s'avérer nécessaires. Pour tenir compte de la souplesse et de l'élasticité et garantir l'intégrité du réservoir interne (1), ces systèmes classiques pourront être remplacés par des bandes textiles (8) d'une largeur suffisante pour répartir la charge. La matière de ces bandes textiles (8) sera résistante et isolante thermiquement, comme par exemple de la fibre de verre. Une autre solution ou une solution complémentaire consiste à mettre sur le réservoir interne (1) des butées (9) qui permettront de garantir dans tous les cas une épaisseur minimum de sphères ou de microsphères creuses entre le réservoir interne (1) et l'enveloppe extérieure (2). Une variante consiste à intégrer dans une même enveloppe extérieure plusieurs réservoirs internes reliés entre eux ou pas.

[0010] Comme illustré sur la [Fig.2], la présente invention peut être combinée avec le descriptif de la demande de brevet n° FR2011805. Dans ce cas, le réservoir interne est composé d'un réservoir primaire (11) étanche dans lequel est contenu le fluide cryogénique par exemple de l'hydrogène et englobé dans un réservoir secondaire (12) également étanche dans lequel est contenu un fluide de refroidissement et/ou d'inertage, par exemple de l'hélium. Pour jouer son rôle protecteur en cas de fuite du réservoir primaire, l'hélium est maintenu à une pression supérieure à celle du stockage de l'hydrogène. Le réservoir primaire (11) sera construit rigide alors que le réservoir secondaire (12) se composera d'un simple liner tel que défini précédemment afin de transmettre tout ou partie de sa pression aux sphères ou microsphères creuses (3) sous vide.

[0011] De fait, comme dans le cas précédent, l'enveloppe extérieure (13) subira un mode de chargement réduit voire de type traction et une déformation en extension, comme s'il s'agissait d'un réservoir sous pression. La structure de cette enveloppe extérieure (13) peut donc également être allégée au regard des technologies traditionnelles et leurs modes de charges et de flambage. Pour limiter l'extension du réservoir secondaire (12) particulièrement en cas de surpression du circuit d'inertage, le dispositif peut prévoir des renforts (14). Pour augmenter encore la sécurité du réservoir, l'enveloppe extérieure (13) peut recevoir sur sa face interne un liner étanche (14) ou un revêtement

de surface de type verni, peinture ou métallisation de faible émissivité pour limiter les transferts radiatifs. De même, le dispositif pourra posséder un ou plusieurs écrans thermiques de thermalisation, passifs ou actifs, disposés au milieu des sphères et microsphères creuses. Ces écrans pourront être ajourés pour permettre le passage des sphères ou des microsphères creuses et l'équilibre des contraintes mécaniques entre leur face interne et leur face externe.

[0012] L'innovation telle que décrite précédemment permet donc de créer des réservoirs cryogéniques légers de forme quelconque. Par exemple, il est possible créer des réservoirs de forme élancée et plane facilement logeable dans les espaces exigus. Ainsi ces réservoirs cryogéniques légers seront particulièrement utiles dans le cadre de carburants cryogéniques comme l'hydrogène, embarqués et utilisés dans le cadre d'engins aériens, spatiaux, terrestres, navals ou sous-marins. L'épaisseur de sphères ou microsphères creuses (3) entre l'enveloppe extérieure (2 ou 13) et l'extérieure du réservoir interne (1 ou 12) permettra d'ajuster le niveau d'isolation en fonction de la durée nécessaire de stockage du carburant dans l'engin.

[0013] Dans le cadre de l'avion à hydrogène, ce dispositif permettra de stocker des carburants cryogéniques dans le caisson central, dans les soutes et aussi dans les ailes de l'aéronef en s'intégrant dans tout ou partie de la structure de ces dernières. Par intégration, il faut comprendre ici l'association de plusieurs fonctions dans un même élément. Par exemple, l'enveloppe extérieure peut faire office simultanément de tout ou partie de peau de l'aile, et/ou au travers de sa rigidité structurelle le réservoir cryogénique peut participer à la reprise des efforts de structure tels que ceux des longerons et/ou des nervures. Le réservoir interne pourra être décomposé en plusieurs réservoirs internes pour permettre d'insérer des renforts internes supplémentaires à l'enveloppe extérieure pour rigidifier l'aile. Par une action pilotée et/ou régulée, le ou les vases d'expansion permettent de limiter la contrainte de l'enveloppe extérieure en fonction de la pression atmosphérique durant le vol.

Revendications

[Revendication 1] Dispositif de réservoir pour fluides cryogéniques, constitué d'un ou de plusieurs réservoirs internes (1) étanches dans lesquels est stocké un fluide cryogénique, lui-même ou eux-mêmes contenus dans une enveloppe extérieure (2 ou 13), dont l'espace entre le ou les réservoirs internes (1) et l'enveloppe extérieure (2 ou 13) est rempli par des sphères ou des microsphères (3) sous contraintes mécaniques et mis sous vide, et caractérisé par le fait que le système prévoit au moins un vase d'expansion (7), lui aussi mis sous vide, qui comprend une réserve de sphères ou microsphères creuses et un système mécanique capable de les transférer vers l'interstice entre le réservoir interne (1) et l'enveloppe externe (2), et permet de régler et/ou de réguler et/ou piloter la contrainte interne sur les sphères ou microsphères (3).

[Revendication 2] Dispositif selon la revendication 1, caractérisé par le fait que le système permet d'amortir les chocs et les vibrations internes ou externes au dispositif, et/ou de compenser l'endommagement d'une partie des sphères ou microsphères.

[Revendication 3] Dispositif selon les revendications 1 à 2, caractérisé par le fait que le ou les réservoirs internes (1) sont constitués d'un liner interne qui est une structure d'une certaine souplesse ou extensibilité dans un matériau élastique et/ou malléable et d'une faible épaisseur, capable de transmettre à l'enveloppe extérieure (2) via les sphères ou microsphères creuses (3) une contrainte d'extension.

[Revendication 4] Dispositif selon les revendications 1 à 3, caractérisé par le fait que le réservoir interne est composé d'un réservoir primaire (11) étanche et rigide dans lequel est contenu le carburant cryogénique par exemple de l'hydrogène, et englobé dans un réservoir secondaire (12) également étanche dans lequel est contenu un fluide de refroidissement et/ou d'inertage et constitué d'un liner, capable de transmettre à l'enveloppe extérieure (13) via les sphères ou microsphères creuses (3) une contrainte d'extension.

[Revendication 5] Dispositif selon les revendications 1 à 4, caractérisé par le fait qu'il existe des supports fixes ou souples maintenant le réservoir interne (1) dans l'enveloppe extérieure (2 ou 13).

[Revendication 6] Dispositif selon la revendication 5, caractérisé par le fait que les supports sont constitués de bandes textiles (8) d'une largeur suffisante pour répartir la charge sur le réservoir interne (1).

[Revendication 7] Dispositif selon les revendications 1 à 6, caractérisé par le fait qu'il existe sur le réservoir interne des butées (9) capables de garantir une épaisseur minimum de sphères ou de microsphères creuses (3) entre le réservoir interne (1) et l'enveloppe extérieure (2 ou 13).

[Revendication 8] Dispositif selon les revendications 1 à 7, caractérisé par le fait que l'enveloppe extérieure (2 ou 13) peut recevoir sur sa face interne un liner étanche (5) ou un revêtement de surface de type verni, peinture ou métallisation.

[Revendication 9] Dispositif selon les revendications 1 à 8, caractérisé par le fait le réservoir interne (1) et/ou le réservoir primaire (11) et/ou le réservoir secondaire (12) et/ou l'enveloppe extérieure (2 ou 13) comporte des raidisseurs capables de limiter les déformations.

[Revendication 10] Dispositif selon les revendications 1 à 9, caractérisé par le fait que le dispositif possède un ou plusieurs écrans thermiques de thermalisation disposés entre les sphères et microsphères creuses.

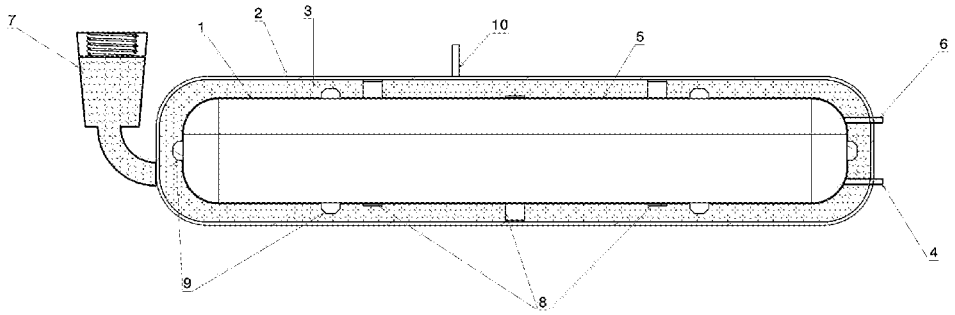
[Revendication 11] Dispositif selon les revendications 1 à 10, caractérisé par le fait que le dispositif pourra disposer d'un ensemble de piquages, de pompes, de vannes, de filtres, de soupapes, d'évents, de sondes et/ou de capteurs nécessaires à son fonctionnement, à sa surveillance et à son entretien.

[Revendication 12] Dispositif selon les revendications 1 à 11, caractérisé par le fait qu'il est utilisé dans le cadre de carburants cryogéniques et embarqués à bord d'engins aériens, spatiaux, terrestres, navals ou sous-marins.

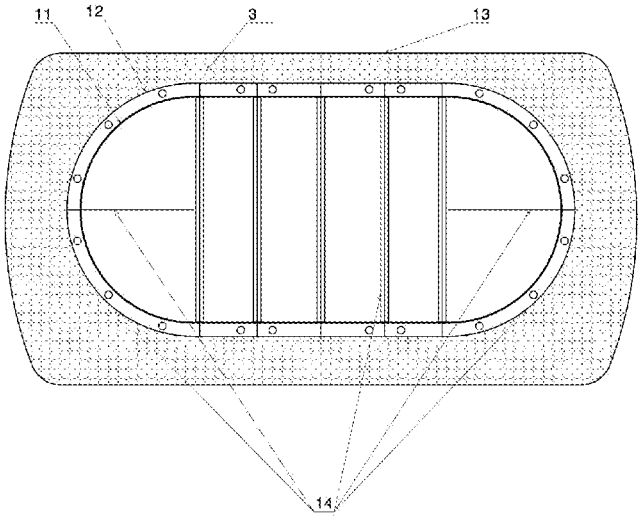
[Revendication 13] Dispositif selon les revendications 1 à 12, caractérisé par le fait que le réservoir cryogénique est intégré et contribue à la structure d'un aéronef.

[Revendication 14] Dispositif selon les revendications 1 à 13, caractérisé par le fait que le système permet de limiter la contrainte de l'enveloppe extérieure, par exemple en fonction de la pression atmosphérique.

[Fig. 1]



[Fig. 2]



RAPPORT DE RECHERCHE

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

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveauté) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.
Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

[x] Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☐ Le demandeur a maintenu les revendications.

[x] Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

EP 0 012 038 A1 (AIR PROD & CHEM [US])
11 juin 1980 (1980-06-11)

DE 10 2009 055108 B4 (EUKLIT GMBH [DE])
18 mars 2021 (2021-03-18)

JP S58 131498 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD)
5 août 1983 (1983-08-05)

DE 10 2004 023533 A1 (BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG [DE])
8 décembre 2005 (2005-12-08)

WO 2008/133608 A1 (KEIP CHARLES P [US])
6 novembre 2008 (2008-11-06)

EP 0 629 810 B1 (PRAXAIR TECHNOLOGY INC [US]) 25 mars 1998 (1998-03-25)

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

NEANT

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

NEANT