

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ **PROCEDE DE FABRICATION DANS L'ESPACE DE STRUCTURES DE GRANDES DIMENSIONS.**

②② **Date de dépôt :** 10.08.17.

③③ **Priorité :**

④③ **Date de mise à la disposition du public
de la demande :** 15.02.19 Bulletin 19/07.

④⑤ **Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention :** 06.09.19 Bulletin 19/36.

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

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ **Références à d'autres documents nationaux
apparentés :**

○ **Demande(s) d'extension :**

⑦① **Demandeur(s) :** AIRBUS DEFENCE AND SPACE
SAS Société par actions simplifiée — FR.

⑦② **Inventeur(s) :** CARPONCIN DELPHINE et FIGUS
CHRISTOPHE.

⑦③ **Titulaire(s) :** AIRBUS DEFENCE AND SPACE SAS
Société par actions simplifiée.

⑦④ **Mandataire(s) :** CABINET PLASSERAUD.

FR 3 070 049 - B1



DOMAINE DE L'INVENTION

L'invention concerne un procédé de fabrication dans l'espace d'une structure rigide comprenant un treillis, et une structure obtenue par ce procédé. L'invention concerne également une machine de fabrication d'une telle structure.

5 L'invention s'applique notamment à la fabrication de structures de grandes dimensions telles que des réflecteurs d'antennes, des miroirs optiques, ou encore des structures de liaisons de satellites d'une constellation satellitaire.

ETAT DE LA TECHNIQUE

10 Pour un grand nombre d'applications, il est désirable d'installer dans l'espace des structures de grandes dimensions, et en particulier des structures dont les dimensions peuvent dépasser la dimension caractéristique d'une coiffe de lanceur, de l'ordre de 5 mètres.

Pour ce faire, il est aujourd'hui connu de créer des structures au sol qui sont
 15 pliables afin de pouvoir être contenues dans une coiffe de lanceur, puis déployées dans l'espace. C'est le cas notamment de réflecteurs d'antenne ou de miroirs. Cette solution n'est toutefois pas satisfaisante car la contrainte pour qu'une structure soit pliable la rend plus complexe à concevoir et fabriquer, et ne permet pas de s'affranchir pleinement des contraintes dimensionnelles liées aux dimensions de la
 20 coiffe d'un lanceur.

Pour s'affranchir de ces contraintes, des efforts de recherche sont menés pour développer des systèmes permettant de fabriquer et assembler des structures dans l'espace.

On connaît par exemple des solutions de fabrication de structures basées
 25 sur la technique de la fabrication additive (ou impression 3D) de matériaux thermoplastiques, éventuellement renforcés par des fibres de carbone. Ces solutions présentent l'avantage de permettre, par un échauffement modéré de la matière (typiquement inférieur à 300°C) par rapport à une fabrication additive de métal, la création et l'assemblage de structures de grandes dimensions.

30 Ces solutions présentent néanmoins des inconvénients importants. En premier lieu, les matériaux thermoplastiques sont peu adaptés aux environnements spatiaux. En effet, les structures de grandes dimensions installées dans l'espace sont exposées à un flux électromagnétique important qui tend à les charger en particules ionisées ; or les matériaux thermoplastiques présentent une conductivité

électrique trop faible pour permettre un écoulement de ces charges électriques lorsque les dimensions de ces structures deviennent conséquentes. Un autre inconvénient de ces matériaux est que leur forte sensibilité aux ultra-violets et à l'oxygène atomique tend à diminuer la durée de vie des structures obtenues.

5 De plus, dans l'espace, les variations thermiques sont très importantes, de sorte que les matériaux utilisés doivent présenter un coefficient de dilatation thermique faible pour limiter les dilatations thermiques des structures, ce qui n'est pas le cas pour les matériaux thermoplastiques non renforcés par des fibres de carbone. Les structures fabriquées avec cette technologie sont donc susceptibles
10 de se déformer, ce qui cause des incertitudes dimensionnelles qui ne sont pas acceptables, notamment pour des miroirs optiques ou des réflecteurs d'antennes.

Pour augmenter la durée de vie de ces structures en environnement spatial et augmenter leur conductivité électrique surfacique, il a été proposé de revêtir les
15 éléments assemblés d'une couche métallique. Le dépôt d'une couche métallique en orbite est cependant susceptible de générer des éléments contaminants pour les surfaces optiques ou capteurs voisins.

Le métal est alors un matériau intéressant pour la fabrication de structures de grandes dimensions en orbite. Sa mise en forme par fabrication additive de
20 couche (Additive Layer Manufacturing) ou impression 3D requiert néanmoins un chauffage à des températures bien au-delà de la température d'utilisation des structures obtenues, et conduit en outre à une déformation de la matière lors du refroidissement qui contribue à l'incertitude dimensionnelle de la structure.

La fusion de toute la matière, telle que le nécessite le procédé d'impression
25 3D est donc chronophage et énergivore. De plus, le refroidissement dans l'espace du métal chauffé ne peut être réalisé que par rayonnement et non par convection, ce qui peut le rendre encore plus long.

Enfin, la mise en forme de métaux par fabrication additive entraîne une dégradation de l'état de surface du matériau métallique due à sa mise en fusion et à
30 son refroidissement. De plus ce procédé reste susceptible de générer des fumées contaminant les surfaces des optiques ou des capteurs voisins.

On connaît aussi du document US 20160185471 un procédé de fabrication d'une structure dans l'espace par assemblage d'un ensemble d'éléments qui sont préfabriqués au sol et emmenés dans un lanceur. Ce type de réalisation est

contraignant car il nécessite en termes de logistique une quantité de pièces différentes importantes, et de ce fait non optimale en termes de masse.

PRESENTATION DE L'INVENTION

5 L'invention a pour but de pallier au moins en partie les inconvénients de l'art antérieur.

En particulier, un but de l'invention est de proposer un procédé de fabrication de structures de grandes dimensions dans l'espace, moins énergivore et moins coûteux que l'art antérieur.

10 Un autre but de l'invention est de proposer un procédé de fabrication adaptable à une grande diversité de structures et de fonctions.

Un autre but de l'invention est de proposer un procédé de fabrication n'impliquant pas d'apport de chaleur.

15 Un autre but de l'invention est de proposer des structures présentant une durée de vie et une stabilité dimensionnelle améliorées, et une conductivité électrique satisfaisante pour décharger les particules ionisées accumulées lors l'exposition à des champs électromagnétiques.

20 A cet égard, l'invention a pour objet un procédé de fabrication dans l'espace d'une structure rigide comprenant un treillis, caractérisé en ce qu'il comprend :

- la réalisation d'au moins deux éléments d'armature à partir d'un enroulement de fil ou de ruban métallique, et
- la réalisation du treillis par assemblage à froid des éléments d'armature.

25 Avantageusement, mais facultativement, le procédé de fabrication peut en outre comprendre au moins l'une des caractéristiques suivantes :

- la réalisation de chaque élément d'armature peut comprendre les étapes suivantes :
 - 30 o dérouler et tendre une longueur de fil ou de ruban métallique,
 - o découper ladite longueur de fil ou ruban métallique.
- la réalisation de chaque élément d'armature peut en outre comprendre une étape de pliage de la longueur de fil ou ruban métallique découpée selon au moins un pli orthogonal à la direction principale de la longueur de fil ou ruban métallique découpée.

- Chaque élément d'armature peut être réalisé à partir d'un enroulement de ruban métallique, et la réalisation de chaque élément d'armature comprend alors une étape de pliage de la longueur de ruban métallique découpée selon un pli parallèle à la direction principale de ladite longueur pour conférer à celle-ci une section transversale en forme de L.
 - Le procédé peut en outre comprendre l'assemblage à froid d'éléments d'armature pour former une pluralité de modules structurels élémentaires, et l'assemblage à froid de modules structurels élémentaires de manière à former le treillis.
 - l'assemblage à froid peut être mis en œuvre par agrafage, clinchage, attache magnétique ou soudure à froid par adhésion moléculaire.
 - Le procédé peut en outre comprendre la fixation sur le treillis d'au moins une tuile fonctionnelle parmi le groupe comprenant :
 - o une tuile de réflecteur d'antenne comprenant une grille métallique adaptée pour réfléchir des ondes radiofréquences,
 - o une tuile de réflecteur optique comprenant une surface optique réfléchissante dans le domaine du visible,
 - o une tuile de protection comprenant un cadre sur lequel est tendue une feuille d'isolation mono ou multicouche,
 - o une tuile écran comprenant une surface dense avec ou sans traitement de surface émissif, pour la protection contre des micro-météorites.
 - la fixation d'une tuile sur le treillis est avantageusement réversible, et peut être mise en œuvre par soudure à froid par adhésion moléculaire, attache magnétique, ou au moyen d'une pince, d'un adhésif double-face ou de bandes de velours-crochet.
 - le matériau du fil ou ruban métallique peut être de l'Invar, du titane, un alliage à base d'aluminium, ou un alliage à base de carbone.
- L'invention a également pour objet une structure rigide comprenant un treillis, caractérisée en ce qu'elle est obtenue par la mise en œuvre du procédé selon la description qui précède.

Dans des modes de réalisation, la structure rigide peut être un miroir optique, un réflecteur d'antenne, un écran de protection, un habitat spatial, ou une structure de liaison de satellites d'une constellation satellitaire.

- 5 Avantageusement, la structure rigide comprend un treillis et au moins une tuile fonctionnelle fixée sur le treillis, et chaque tuile fonctionnelle comprend un dispositif de positionnement de la tuile et un dispositif de communication sans fil autonomes en énergie.
- 10 L'invention porte également sur une machine de fabrication d'une structure rigide dans l'espace, comprenant :
- un dévidoir d'un fil ou d'un ruban métallique,
 - un dispositif adapté pour dérouler une portion de fil ou de ruban,
 - un outil de découpe du fil ou du ruban métallique, et
- 15 - un équipement d'assemblage comprenant au moins un bras articulé adapté pour assembler à froid deux éléments d'armature formés à partir de fil ou de ruban métallique, et
- un organe de contrôle dimensionnel de la structure en cours de fabrication, la machine étant adaptée pour la mise en œuvre du procédé selon la description qui
- 20 précède.

Avantageusement, la machine de fabrication comprend en outre une interface de communication à distance adaptée pour recevoir des instructions de commande depuis la terre.

- 25 L'invention a également pour objet un satellite, comprenant une machine de fabrication selon la description qui précède.

- Un autre objet de l'invention concerne un procédé de commande depuis le sol d'une
- 30 machine de fabrication d'une structure dans l'espace, comprenant l'envoi à la machine d'une séquence d'instructions configurée pour la mise en œuvre du procédé selon la description qui précède.

Le procédé proposé permet de réaliser des structures de grandes dimensions avec un apport d'énergie minimal puisque l'assemblage des éléments d'armature est réalisé à froid. Le fait de se dispenser d'un apport de chaleur permet aussi de supprimer les problèmes d'évacuation de la chaleur, de modification de l'état de surface du métal et de génération de fumée qui pourrait générer une contamination (notamment d'équipements optiques situés en proximité). Il permet aussi de réduire des déformations de la structure lors de sa fabrication. La durée nécessaire à la réalisation de la structure est également raccourcie.

La structure obtenue par le procédé comporte un treillis de support qui peut être fonctionnalisé de nombreuses façons différentes en y fixant des tuiles fonctionnelles, par exemple pour former un réflecteur d'antenne, un miroir, voire une structure d'habitation.

Comme le treillis de support est formé à partir d'un fil ou d'un ruban métallique déroulé dans l'espace, seules les tuiles et le fil ou ruban métallique doivent être acheminées par un lanceur, et les contraintes de dimensions liées aux dimensions de la coiffe d'un lanceur sont supprimées.

On peut ainsi réaliser des treillis dont la géométrie et les dimensions sont déterminées en fonction des besoins, et non en fonction des contraintes d'acheminement, ce qui permet d'envisager des formes de structures inédites. En particulier, les treillis peuvent être conçus afin de minimiser l'énergie, la masse de matériel, et le temps nécessaires à leur fabrication, tout en minimisant les potentielles déformations de la structure.

De plus, le fait que le treillis soit réalisé à partir d'un fil ou d'un ruban métallique permet d'assurer une bonne conductivité électrique et, en fonction du métal utilisé, permet également d'obtenir un coefficient de dilatation thermique suffisamment faible pour limiter ses déformations avec les variations thermiques dans l'espace.

Dans un mode de réalisation, l'assemblage à froid des éléments d'armature est réalisé par adhésion moléculaire. De ce fait, il suffit d'un contact avec une faible pression entre deux éléments d'armature pour les assembler, ce qui représente une faible dépense d'énergie.

Dans un mode de réalisation, les éléments d'armatures utilisés sont formés à partir d'un ruban plié dans sa longueur pour présenter une section en L. Ceci

augmente la raideur du treillis obtenu tout en limitant la quantité de matériau nécessaire à sa fabrication.

Par ailleurs, la machine de fabrication proposé permet non seulement de fabriquer une telle structure dans l'espace, mais également de réaliser un contrôle dimensionnel tout au long de sa fabrication.

DESCRIPTION DES FIGURES

D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la description qui suit, qui est purement illustrative et non limitative, et qui doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :

- 10 - Les figures 1a à 1d représentent des exemples d'éléments d'armature fabriqués lors de la mise en œuvre du procédé de fabrication selon l'invention,
- Les figures 2a et 2b représentent deux exemples de modules élémentaires fabriqués lors de la mise en œuvre du procédé de fabrication selon un mode
- 15 de réalisation de l'invention.
- La figure 3 représente un exemple de treillis obtenu par la mise en œuvre du procédé,
- Les figures 4a à 4c représentent des exemples de structures comprenant respectivement un treillis et une ou plusieurs tuiles fonctionnelles.
- 20 - La figure 5 représente schématiquement les principales étapes du procédé de fabrication selon un mode de réalisation de l'invention.
- La figure 6 représente schématiquement un exemple de machine de fabrication d'une structure selon un mode de réalisation de l'invention.
- La figure 7 illustre schématiquement un exemple de robot d'inspection d'une
- 25 structure.

DESCRIPTION DETAILLEE D'AU MOINS UN MODE DE REALISATION

Procédé de fabrication de structures dans l'espace

30 On va maintenant décrire, en référence à la figure 5, un procédé de fabrication de structures dans l'espace.

Par « dans l'espace », on entend la partie de l'univers située au-delà de l'atmosphère terrestre, et située à l'extérieur de tout véhicule ou structure

d'habitation située dans l'espace comme par exemple la station spatiale internationale.

Ce procédé de fabrication permet de fabriquer une structure 1 rigide comportant un treillis métallique 10, et, dans certains modes de réalisation, au moins une tuile fonctionnelle 20 fixée au treillis.

Par « structure rigide » on entend une structure dépourvue d'articulations, puisque comme on va le voir le procédé de fabrication permet de fabriquer, directement dans l'espace, une structure de grandes dimensions, sans avoir besoin d'acheminer cette structure sous forme repliée dans une coiffe de lanceur.

Le procédé de fabrication comprend donc une étape de fabrication 100 d'un treillis métallique 10. Cette étape comprend la fabrication 110 d'au moins deux éléments d'armature 11 à partir de fil métallique ou de ruban métallique déroulé à partir d'un dévidoir.

Le fil ou le ruban métallique est choisi dans un matériau présentant un faible coefficient de dilatation thermique, de préférence inférieur à 5.10^{-6} K^{-1} , permettant d'éviter que le treillis ne se déforme lors des variations de température dans l'espace.

Avantageusement, le fil ou ruban métallique est réalisé dans un alliage de fer et de nickel dans les proportions respectives de 64 et 36% connu sous le nom commercial d'InvarTM, car il présente un coefficient de dilatation thermique très faible, inférieure à 2.10^{-6} K^{-1} . En variante, le matériau choisi pour le fil ou le ruban métallique peut être le titane, ou un alliage à base d'aluminium, ou encore un alliage chargé de carbone tel que l'acier.

Chaque élément d'armature 11 est obtenu en déroulant une longueur L de fil métallique ou de ruban métallique, et en redressant cette longueur au cours d'une étape 111, puis en découpant cette longueur au cours d'une étape 112.

Avantageusement, la fabrication 110 d'un élément d'armature 11 comprend en outre au moins un pliage 113 de la longueur de fil ou de ruban métallique, celle-ci présentant alors au moins deux portions formant un angle l'une par rapport à l'autre. Le pli est réalisé dans une direction orthogonale à la direction principale de la longueur de fil ou de ruban métallique découpée.

Des exemples d'éléments d'armature 11 sont représentés sur les figures 1a et 1b. Sur la figure 1a, un élément d'armature 11 est formé par une longueur de fil rectiligne. Sur les figures 1b et 1c, l'élément d'armature 11 est formé par une

longueur de fil qui a été repliée à intervalles réguliers pour former un motif géométrique périodique, en l'occurrence un triangle sur la figure 1b et un carré sur la figure 1c.

Avantageusement, dans le cas où un élément d'armature 11 est réalisé à
 5 partir de ruban métallique enroulé, la fabrication 110 de l'élément comprend également une étape 114 de pliage du ruban métallique, le pli s'étendant selon la direction principale de la longueur de ruban découpée, pour conférer au ruban une section transversale en L, comme sur la figure 1d, ou éventuellement en U.

Ceci permet d'augmenter la raideur du ruban qui est ensuite utilisé pour
 10 former un élément d'armature 11. Cette étape est donc, le cas échéant, mise en œuvre avant l'étape de pliage 113 décrite ci-avant.

En variante, et de préférence dans le cas où l'élément d'armature 11 est formé par du fil métallique, ce fil peut être torsadé pour présenter une raideur accrue. Dans ce cas le procédé peut comprendre une étape consistant à torsader le
 15 fil avant la mise en œuvre de l'étape 113.

Une fois qu'au moins deux éléments d'armature 11 sont obtenus, le procédé de fabrication comprend une étape 120 d'assemblage de ces éléments d'armature. Cet assemblage est réalisé à froid, c'est-à-dire sans aucun apport de chaleur. Dans l'espace, on comprend que cet assemblage est donc réalisé à une température
 20 inférieure à la température de fusion du matériau formant le fil ou le ruban.

Ceci permet de diminuer la quantité d'énergie requise pour la mise en œuvre du procédé, mais aussi d'éviter tout dégagement de fumée qui pourrait recouvrir les optiques et capteurs voisins. En évitant le recours à la soudure qui implique de fondre du métal, on évite aussi de dégrader l'état de surface du métal fondu puis refroidi. Le procédé ne nécessite donc pas de traitement thermique ni le dépôt d'un revêtement supplémentaire.

L'assemblage de deux éléments d'armature peut être réalisé de plusieurs manières, par exemple, par clinchage, qui est un assemblage par emboutissage local de deux pièces à l'aide d'un poinçon. En exerçant avec le poinçon une
 30 pression sur les deux pièces, la pièce en contact avec le poinçon se déforme localement pour emboutir l'autre pièce.

Dans une variante particulièrement avantageuse de l'assemblage, la pression exercée contre les deux pièces est réduite par rapport à une opération de clinchage, afin d'assembler les éléments d'armature par adhésion moléculaire sans

les déformer (ou de manière très réduite par rapport à une opération de clinchage). On parle dans ce cas de soudure à froid par adhésion moléculaire, qui est permise grâce aux forces de Van des Waals. En effet, tandis que dans l'atmosphère terrestre, les forces de Van der Waals sont considérablement réduites par la présence de poussières ou de fines couches d'oxydation qui se créent ou se déposent en permanence sur des surfaces métalliques, dans l'espace ce phénomène est fortement réduit, de sorte que l'effet des forces de Van der Waals apparaît plus intense. Une pression faible exercée sur certains éléments métalliques d'armature permet donc d'assembler les pièces entre elles.

En variante moins préférée, l'assemblage peut être réalisé par agrafage, c'est-à-dire en rapportant une agrafe venant maintenir en contact les deux éléments d'armature. L'assemblage peut encore être réalisé par une attache magnétique, obtenue en joignant des aimants aux éléments d'armature. L'assemblage peut également être réalisé par ligaturage, en reliant deux éléments d'armature avec une longueur de fil également prélevée à partir du dévidoir, et éventuellement torsadée.

Selon une autre variante, l'assemblage peut être réalisé par emboîtement de deux éléments d'armature. Les extrémités des éléments d'armature devront alors présenter des géométries mâles et femelles par intermittence, qui pourront être réalisées par des outils d'emboutissage dédiés.

Selon un mode de réalisation avantageux du procédé, des éléments d'armature 11 sont assemblés entre eux pour former une pluralité de modules élémentaires 12 au cours de l'étape 120, puis les modules élémentaires 12 sont assemblés entre eux au cours d'une étape 130 pour former le treillis. Ceci permet de concevoir simplement des treillis faciles à fabriquer, tout en étant modulaires pour s'adapter à différentes fonctions ou applications attendues. Des exemples de modules élémentaires sont représentés sur les figures 2a et 2b, et un exemple de treillis est représenté sur la figure 3.

L'assemblage de modules élémentaires est également réalisé à froid, et par les mêmes modes d'assemblage décrits ci-avant pour l'assemblage d'éléments d'armature.

Le treillis 10 obtenu par la mise en œuvre de ce procédé est une structure rigide, c'est-à-dire qu'elle ne comprend pas de charnière ou autre moyen destiné à

la rendre pliable, et peut être utilisé en tant que tel, par exemple pour relier entre eux deux satellites d'une constellation satellitaire, ou en tant que structure porteuse dont la position serait déterminée et sur laquelle on pourrait, au besoin venir fixer des charges utiles, tels que par exemple des boîtiers électroniques d'émission, de réception ou de transmission.

On comprend donc que le treillis peut être conçu au regard de la fonction qu'il doit remplir. En particulier, les éléments d'armature 11, les modules élémentaires 12 et le treillis lui-même 10 peuvent être de dimensions et de formes variables pour s'adapter à la fonction que doit remplir le treillis.

Les contraintes dimensionnelles liées à l'acheminement dans l'espace d'une structure fabriquée sur terre disparaissent également. Par exemple, un treillis reliant entre eux plusieurs satellites d'une constellation peut s'étendre sur plusieurs centaines de mètres.

Le treillis 10 peut également constituer une structure de support sur laquelle est fixée au moins une tuile fonctionnelle 20, et de préférence une pluralité de tuiles fonctionnelles 20, au cours d'une étape 200. Des exemples de structures comprenant un treillis et une ou plusieurs tuiles fonctionnelles sont représentés en figures 4a à 4c.

Les tuiles fonctionnelles 20 sont de préférence fabriquées sur terre et acheminées jusqu'au treillis 10 pour leur fixation à celui-ci.

La structure d'une tuile fonctionnelle 20 est variée en fonction du rôle attendu de la tuile.

Par exemple, selon un mode de réalisation, une tuile peut être une tuile de réflecteur d'antenne radiofréquence, et comprend dans ce cas une grille métallique présentant une taille de maille adaptée à la fréquence d'application (par exemple 5 mm par 5 mm en bande S), comme représenté schématiquement sur la figure 4a.

En variante, la tuile peut être une tuile de réflecteur optique, pour remplir des fonctions de miroir, de radiateur ou de bouclier, comme représenté schématiquement sur la figure 4b. La tuile comprend alors une surface optique réfléchissante pour les longueurs d'onde dans le visible. Cette surface optique peut être rendue réfléchissante par polissage, ou peut être aluminisée, ou encore peut être peinte.

Selon encore une autre variante, la tuile peut encore comprendre un cadre sur lequel est tendue une protection souple, par exemple une feuille de revêtement isolant thermique simple (connue sous l'acronyme anglais SLI pour Single Layer Insulation) ou multiple (connue sous l'acronyme anglais MLI pour Multi Layer Insulation), pour des applications d'écran, d'habitat spatial, etc.

La tuile peut encore être une tuile écran comprenant une surface dense, c'est-à-dire dépourvue d'ouvertures, avec ou sans traitement de surface émissif. Ces tuiles peuvent par exemple comprendre une surface formée par une couche d'aluminium de l'ordre du millimètre d'épaisseur, et peuvent être utilisées à titre de protections contre des micrométéorites.

La fixation de chaque tuile fonctionnelle au treillis est avantageusement réalisée par un mode d'assemblage réversible, de manière à pouvoir au besoin prélever une tuile pour la réparer ou la remplacer.

A cet égard, l'assemblage peut être réalisé par attache magnétique, au moyen de clips ou de pinces, de bandes d'adhésifs double-face ou de bandes de velours-crochet, ou encore par soudure à froid par adhésion moléculaire décrite ci-avant. En effet, en exerçant un effort pour séparer les pièces il est possible de surmonter les forces de Van der Waals.

Avantageusement, chaque tuile 20 peut également comprendre un dispositif d'actionnement et un moyen de communication à distance autonomes en énergie. La tuile comprend un capteur photovoltaïque et une batterie adaptés pour alimenter le dispositif d'actionnement et/ou le moyen de communication à distance lorsque cela est nécessaire.

Ceci est particulièrement avantageux dans le cas de tuiles 20 à fonction optique, puisque cela permet d'obtenir un système d'optique adaptative commandé en temps réel depuis la terre, permettant d'ajuster l'orientation des tuiles et de corriger des défauts d'alignement pouvant être générés lors de leur assemblage sur le miroir.

Les étapes de fabrication 110 et d'assemblage 120, 130 des éléments d'armature ou modules, et le cas échéant de fixation de tuiles fonctionnelles 200, décrites ci-avant, sont toutes mises en œuvre dans l'espace. Pour ce faire, une machine de fabrication adaptée pour mettre en œuvre le procédé est décrite ci-

après en référence à la figure 6. Cette machine est avantageusement portée par une station spatiale en orbite, sur une paroi extérieure de celle-ci, ou sur un satellite.

Machine de fabrication de structures

5 La machine 3 comprend un dévidoir 30 sur lequel est enroulé un fil ou un ruban métallique. Elle comprend également un dispositif 31 de déroulement du fil ou du ruban du dévidoir, ce dispositif pouvant par exemple comprendre un mécanisme fixe adapté pour dérouler le fil ou le ruban en continu, ou en variante un bras articulé 31 muni de doigts de préhension 310, adapté pour saisir et déplacer une portion de
10 fil ou de ruban métallique. Le bras peut ainsi saisir une extrémité du fil et la dérouler à partir du dévidoir 310.

La machine 3 comprend en outre un outil de découpe 32, adapté pour découper une longueur de fil ou du ruban métallique.

Avantageusement, la machine 3 est également adaptée pour plier une
15 longueur découpée de fil ou de ruban métallique pour que cette longueur présente plusieurs portions formant un angle les unes par rapport aux autres. A cet égard, la machine 3 peut comprendre des doigts de préhension 33 adaptés pour saisir une portion du fil ou du ruban. Le bras articulé 31 peut saisir une portion de fil à plier par rapport à la portion saisie par les doigts 33, et pivoter d'un angle désiré pour former
20 la pliure.

La machine 3 peut également être adaptée pour plier une longueur de ruban métallique découpée dans le sens de la longueur, pour conférer au ruban une section en L ou en U. A cet égard elle peut comprendre une presse (non représentée) conformée pour permettre cette pliure par emboutissage ou des galets
25 imposant la forme désirée au ruban afin de réaliser le pliage de façon continue.

La machine 3 comprend un équipement d'assemblage 34 adapté pour assembler à froid deux éléments d'armature ou deux modules élémentaires formés à partir de fil ou de ruban métallique. L'équipement d'assemblage dépend de la nature de l'assemblage qui est mis en œuvre, mais il comprend de préférence au
30 moins un bras articulé permettant de manipuler et de déplacer un élément d'armature ou un module élémentaire par rapport à un autre..

Par exemple, dans le cas d'un assemblage par soudure à froid par adhésion moléculaire, l'équipement d'assemblage 34 peut comporter une table de support munie de doigts de préhension adaptés pour maintenir en position un premier

élément d'armature ou un premier module élémentaire, un bras articulé adapté pour venir positionner un deuxième élément d'armature ou module élémentaire par rapport au premier, et une pince adaptée pour exercer une pression sur les deux éléments d'armature ou modules élémentaires en une pluralité de points pour
5 réaliser l'assemblage.

En variante si l'assemblage est réalisé par clinchage, la pince peut être remplacée par une presse munie d'un poinçon. En variante si l'assemblage est réalisé par agrafage, l'équipement d'assemblage 34 comporte une réserve d'agrafes et un autre bras articulé adapté pour prélever une agrafe et la fixer sur les éléments
10 ou modules à assembler.

L'équipement d'assemblage 34 de la machine est en outre de préférence adapté pour assembler des tuiles sur le treillis ; pour cela le bras articulé peut être muni d'une ventouse permettant de saisir, de positionner et de déposer une tuile par rapport au treillis.

15 La machine 3 est avantageusement autonome ou pilotable depuis la Terre pour permettre une mise en œuvre à distance du procédé de fabrication de structures décrit ci-avant. A cet égard, la machine 3 comprend de préférence une unité de pilotage 35 comprenant un calculateur 350, une mémoire 351, et une interface de communication 352 avec la terre, comprenant de préférence une
20 antenne d'émission et de réception d'ondes radio. L'interface de communication est adaptée pour recevoir des instructions de commande de la machine, lesdites instructions étant traitées par le calculateur 36 pour la mise en œuvre du procédé. Le calculateur est adapté pour commander le fonctionnement des composants de la machine en fonction des instructions de commande reçues pour mettre en œuvre la
25 fabrication d'une structure.

Ainsi on peut commander la machine 3 à distance pour la fabrication d'une structure dans l'espace, par l'envoi d'instructions à la machine depuis un centre de commande au sol.

Avantageusement, la machine 3 comprend également un organe 36 de
30 contrôle dimensionnel de la structure en cours de fabrication, adapté pour vérifier in situ les dimensions de la structure. Cet organe de contrôle dimensionnel est de préférence commandé par l'unité de pilotage 35 en boucle fermée, de sorte que la forme de la structure puisse être vérifiée et corrigée au fur et à mesure de l'assemblage de la structure, l'assemblage d'un nouvel élément à la structure étant

réalisé en tenant compte des défauts de l'assemblage précédent pour compenser ceux-ci.

L'organe de contrôle dimensionnel est avantageusement choisi parmi les technologies suivantes :

- 5 - Emetteur/réflecteur laser, avec optionnellement une fonctionnalité de balayage des surfaces,
- Contrôle dimensionnel par triangulation comprenant trois caméras et un ensemble de cibles,
- Contrôle dimensionnel par photogrammétrie,
- 10 - Système de géopositionnement local par transmetteurs laser infrarouges (par exemple la technologie commercialisée par la société Nikon sous la dénomination iGPS)
- Triangulation par ultrasons,
- Caméra stéréoscopique.

15 En référence à la figure 6, l'organe de contrôle dimensionnel 36 est de préférence monté sur un bras articulé 37 pour pouvoir être positionné à la position voulue relativement à la structure en cours de fabrication.

Avantageusement, en référence à la figure 7 un contrôle dimensionnel global
20 de la structure en fin de fabrication pourra être réalisé par un robot d'inspection 40, configuré pour pouvoir se déplacer par rapport à la structure pour balayer la totalité de la surface de la structure afin de contrôler par exemple le positionnement et la qualité des tuiles.

Pour ce faire, le robot d'inspection peut être adapté pour se déplacer sur la
25 structure, ou pour se déplacer à distance de celle-ci à la façon d'un drone.

De préférence, ce robot peut être aussi configuré pour manipuler les tuiles, afin de modifier les tuiles ou leur orientation. Le robot comprend donc des moyens de contrôle dimensionnel 41, qui peuvent être choisis parmi les technologies mentionnées ci-avant pour l'organe de contrôle dimensionnel 36, des moyens de
30 manipulation des tuiles 42, et une unité de pilotage (non représentée) comprenant un calculateur et une interface de connexion à distance 43 adaptée pour permettre la communication soit entre le robot d'inspection et l'unité de pilotage 35 de la machine 3 de fabrication, soit entre le robot d'inspection et un centre de contrôle au sol.

De préférence, le robot est avantageusement autonome en énergie, pour supprimer tout câble d'alimentation en énergie. Il peut à cet égard comprendre une batterie et/ou un ou plusieurs capteurs photovoltaïques (non représentés).

- 5 La structure étant réalisée par assemblages de briques élémentaires, et pouvant donc présenter une taille importante, les deux modes de contrôle (sur la machine de fabrication et robot de contrôle dimensionnel) proposés permettent d'une part de corriger les déviations provenant du procédé de fabrication, au cours de la mise en œuvre de celui-ci, au niveau de chaque brique élémentaire de la
- 10 structure, et d'autre part de compenser les défauts de forme de la structure en fin de fabrication vis-à-vis de la géométrie désirée initialement.

REVENDEICATIONS

- 5 1. Procédé de fabrication dans l'espace d'une structure rigide (1) comprenant un treillis (10), caractérisé en ce qu'il comprend :
- la réalisation d'au moins deux éléments d'armature (11) à partir d'un enroulement de fil ou de ruban métallique, et
 - la réalisation du treillis (10) par assemblage à froid des éléments d'armature
- 10 (11).
2. Procédé de fabrication selon la revendication 1, dans lequel la réalisation de chaque élément d'armature (11) comprend les étapes suivantes :
- dérouler et tendre une longueur de fil ou de ruban métallique,
- 15 - découper ladite longueur de fil ou ruban métallique.
3. Procédé de fabrication selon la revendication 2, dans lequel la réalisation de chaque élément d'armature (11) comprend en outre une étape de pliage de la longueur de fil ou ruban métallique découpée selon au moins un pli orthogonal à la
- 20 direction principale de la longueur de fil ou ruban métallique découpée.
4. Procédé de fabrication selon l'une des revendications 2 ou 3, dans lequel chaque élément d'armature (11) est réalisé à partir d'un enroulement de ruban métallique, et la réalisation de chaque élément d'armature comprend en outre une étape de pliage
- 25 de la longueur de ruban métallique découpée selon un pli parallèle à la direction principale de ladite longueur pour conférer à celle-ci une section transversale en forme de L.
5. Procédé de fabrication selon l'une des revendications précédentes, comprenant
- 30 l'assemblage à froid d'éléments d'armature (11) pour former une pluralité de modules structurels élémentaires (12), et l'assemblage à froid de modules structurels élémentaires (12) de manière à former le treillis (10).

6. Procédé de fabrication selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'assemblage à froid est mis en œuvre par agrafage, clinchage, attache magnétique ou soudure à froid par adhésion moléculaire.
- 5 7. Procédé de fabrication selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre la fixation sur le treillis (10) d'au moins une tuile fonctionnelle (20) parmi le groupe comprenant :
- une tuile de réflecteur d'antenne comprenant une grille métallique adaptée pour réfléchir des ondes radiofréquences,
 - 10 - une tuile de réflecteur optique comprenant une surface optique réfléchissante dans le domaine du visible,
 - une tuile de protection comprenant un cadre sur lequel est tendue une feuille d'isolation mono ou multicouche,
 - une tuile écran comprenant une surface dense avec ou sans traitement de
 - 15 surface émissif pour la protection contre des micro-météorites.
8. Procédé de fabrication selon la revendication 7, dans lequel la fixation d'une tuile (20) sur le treillis (10) est réversible et mise en œuvre par soudure à froid par adhésion moléculaire, attache magnétique, ou au moyen d'une pince, d'un adhésif
- 20 double-face ou de bandes de velours-crochet.
9. Procédé de fabrication selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le matériau du fil ou ruban métallique est de l'Invar, du titane, un alliage à base d'aluminium, ou un alliage à base de carbone.
- 25
10. Structure rigide (1) comprenant un treillis (10), caractérisée en ce qu'elle est obtenue par la mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications précédentes.
- 30 11. Structure rigide (1) selon la revendication 10, ladite structure (1) étant un miroir optique, un réflecteur d'antenne, un écran de protection, un habitat spatial, ou une structure de liaison de satellites d'une constellation satellitaire.

12. Structure rigide (1) selon l'une des revendications 10 ou 11, comprenant un treillis (10) et au moins une tuile fonctionnelle (20) fixée sur le treillis (10), dans laquelle chaque tuile fonctionnelle (20) comprend un dispositif de positionnement de la tuile et un dispositif de communication sans fil autonomes en énergie.
- 5
13. Machine (3) de fabrication d'une structure rigide (1) dans l'espace, comprenant :
- un dévidoir (30) d'un fil ou d'un ruban métallique,
 - un dispositif (31) adapté pour dérouler une portion de fil ou de ruban,
 - un outil de découpe (32) du fil ou du ruban métallique, et
- 10
- un équipement d'assemblage (34) comprenant au moins un bras articulé adapté pour assembler à froid deux éléments d'armature formés à partir de fil ou de ruban métallique, et
 - un organe de contrôle dimensionnel (36) de la structure en cours de fabrication,
- 15
- la machine étant adaptée pour la mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 9.
14. Machine de fabrication (3) selon la revendication 13, comprenant en outre une interface de communication à distance (352) adaptée pour recevoir des instructions
- 20
- de commande depuis la terre.
15. Satellite, comprenant une machine de fabrication selon l'une des revendications 13 ou 14.
- 25
16. Procédé de commande depuis le sol d'une machine (3) de fabrication d'une structure dans l'espace, comprenant l'envoi à la machine d'une séquence d'instructions configurée pour la mise en œuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 9.

1/6

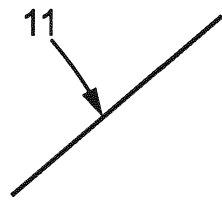


FIG. 1a



FIG. 1b

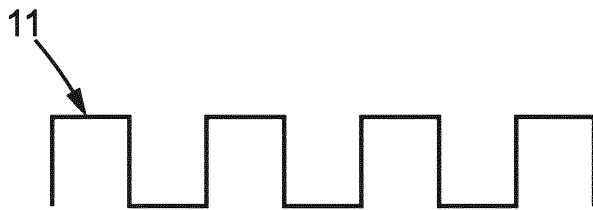


FIG. 1c

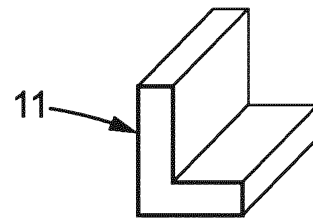


FIG. 1d

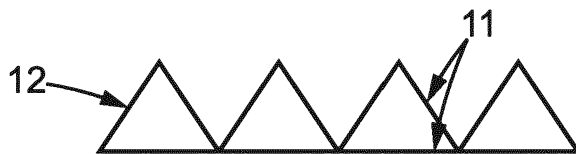


FIG. 2a



FIG. 2b

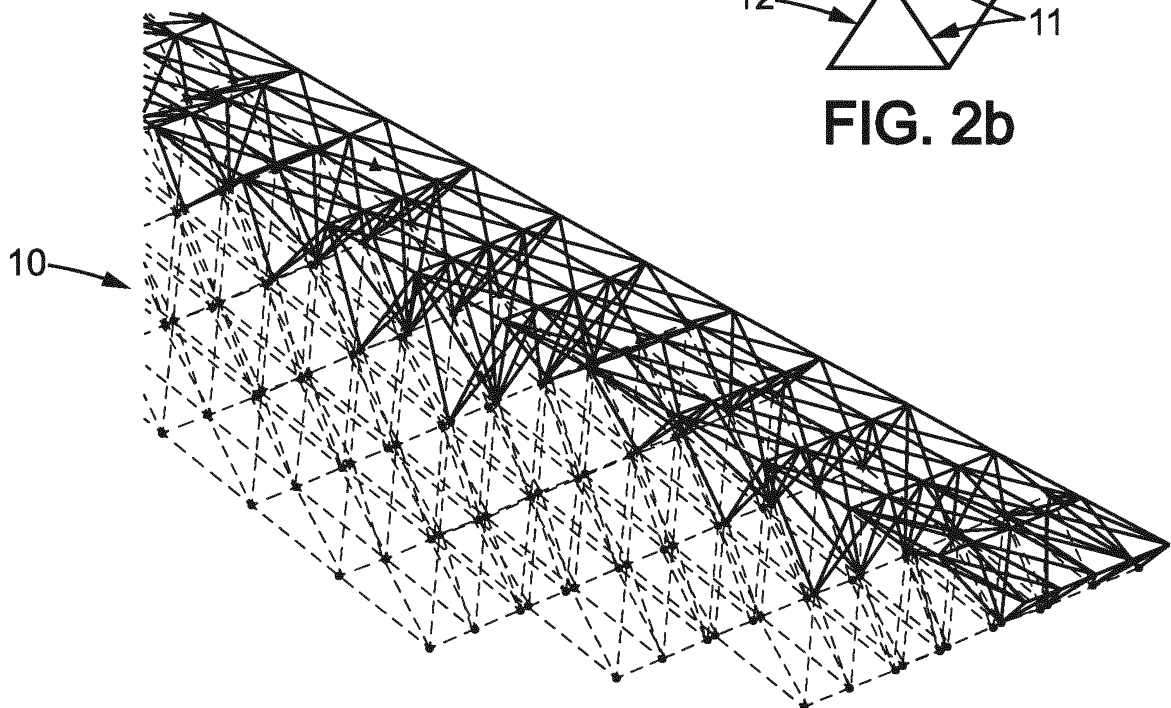


FIG. 3

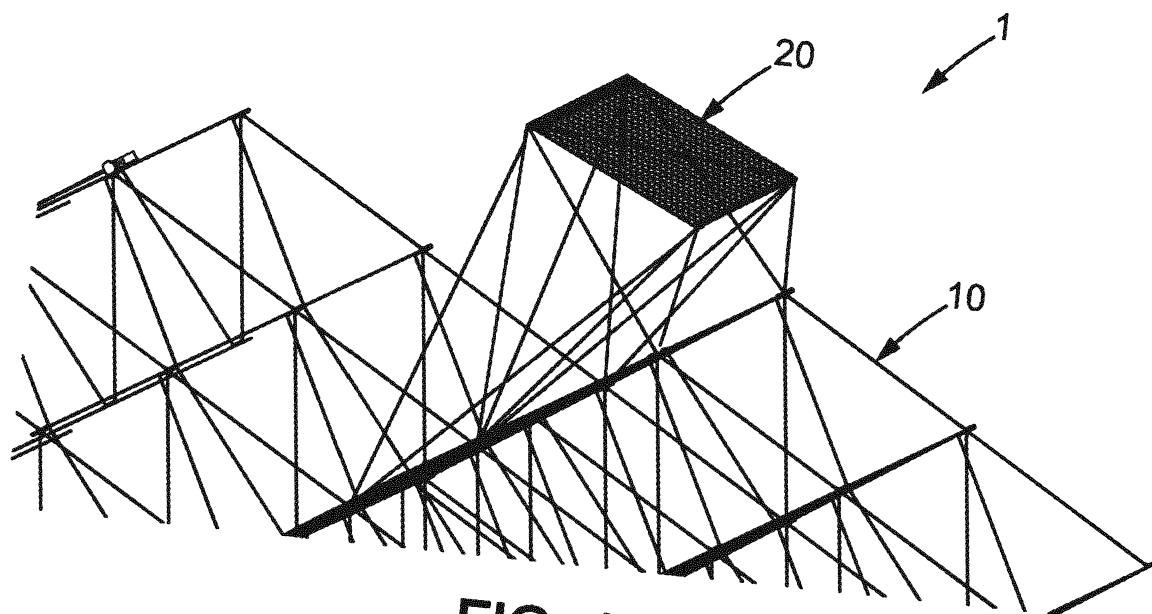


FIG. 4a

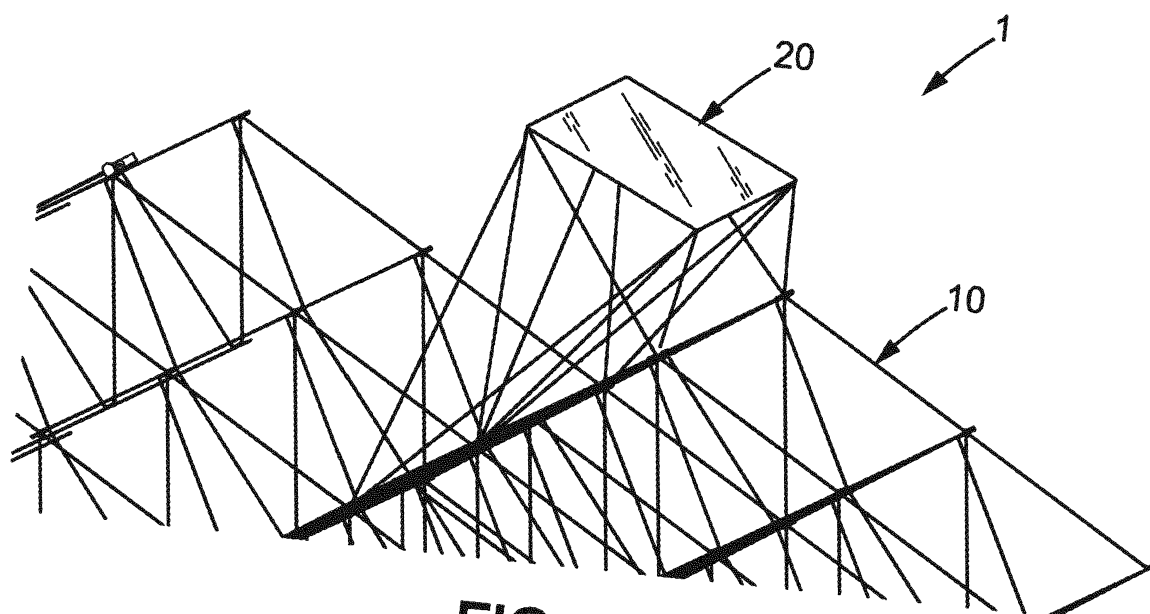


FIG. 4b

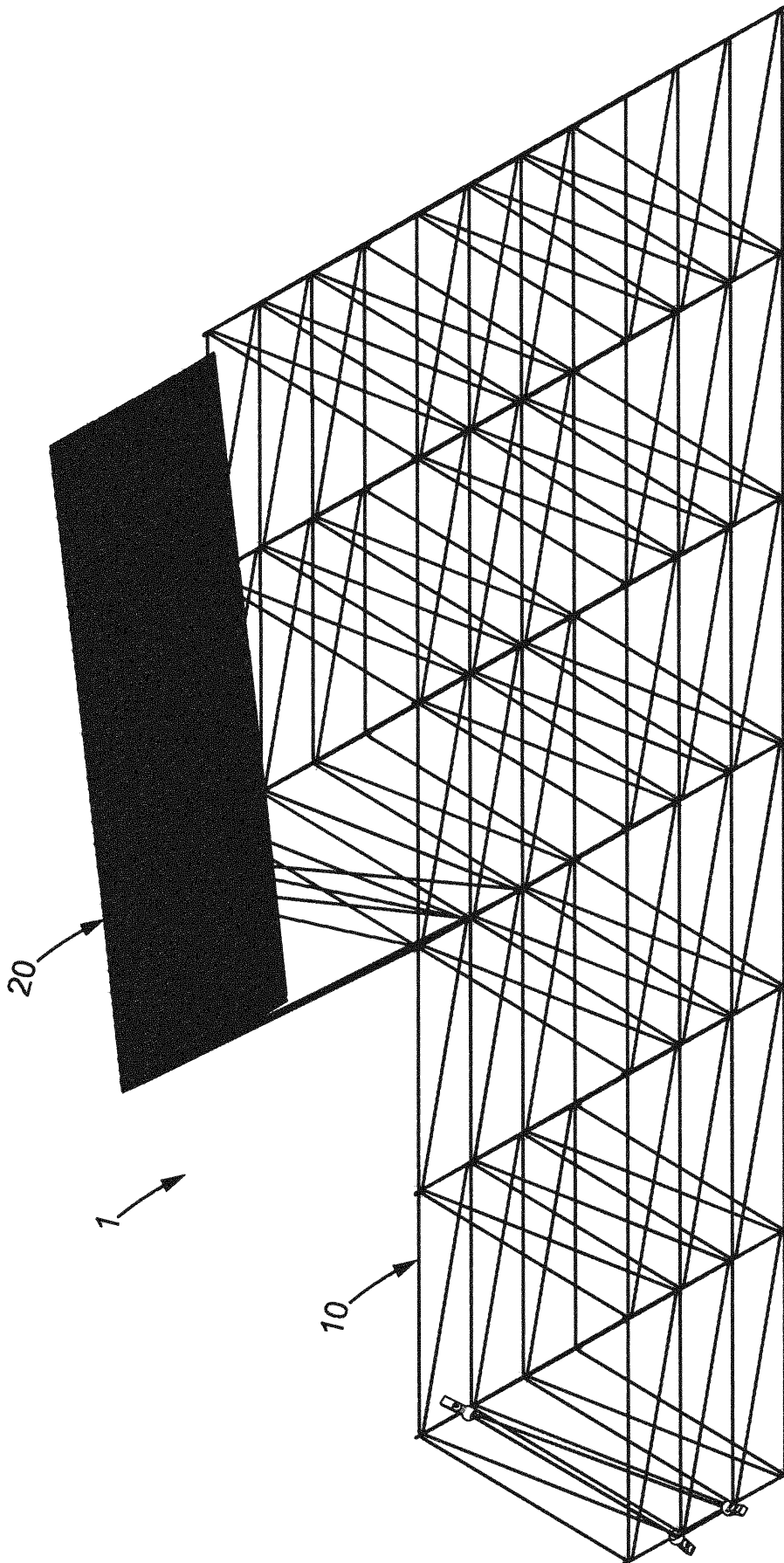
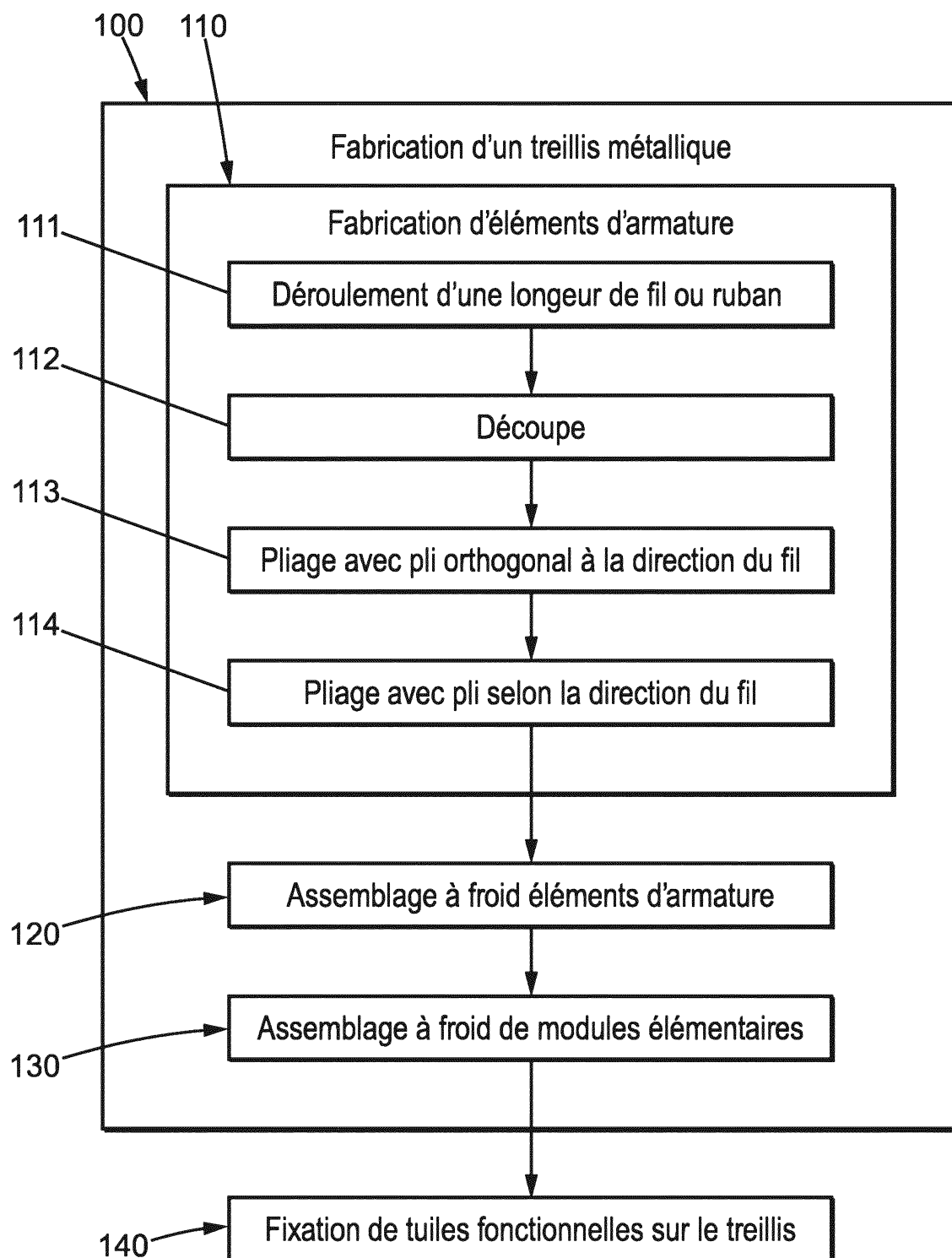
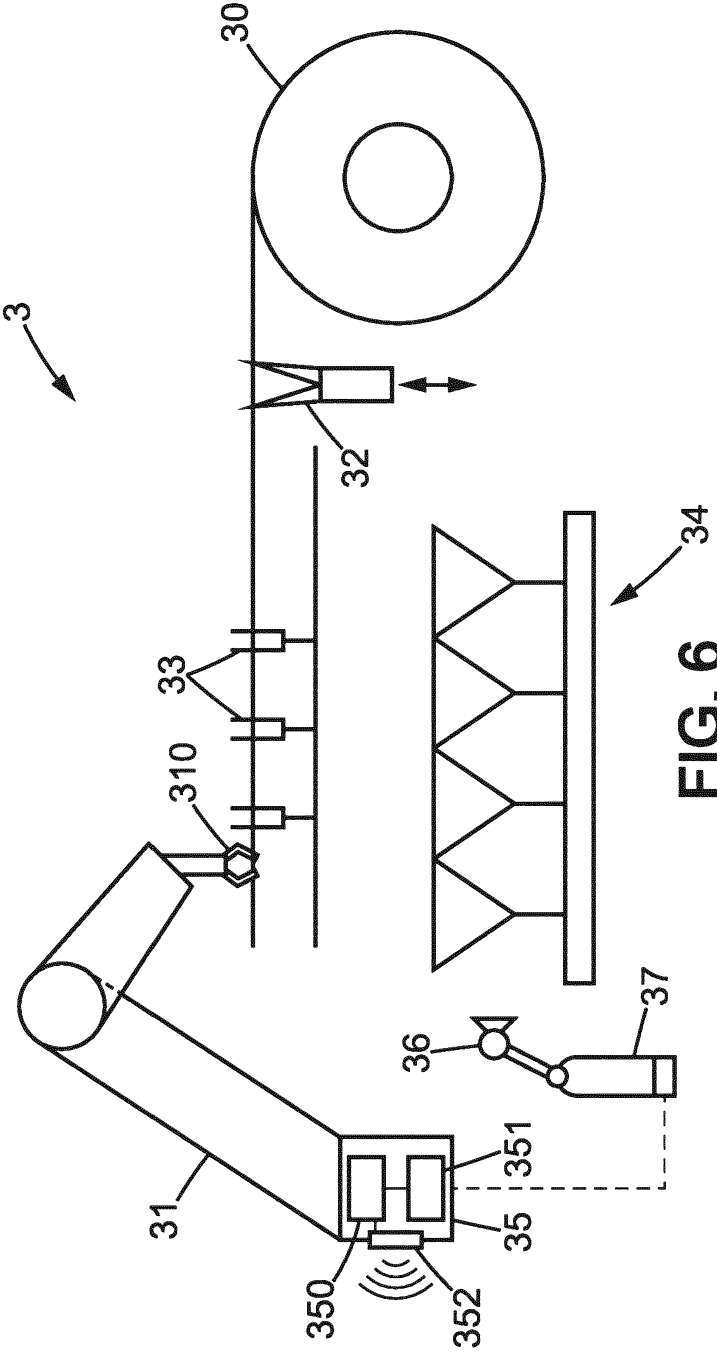


FIG. 4c

**FIG. 5**



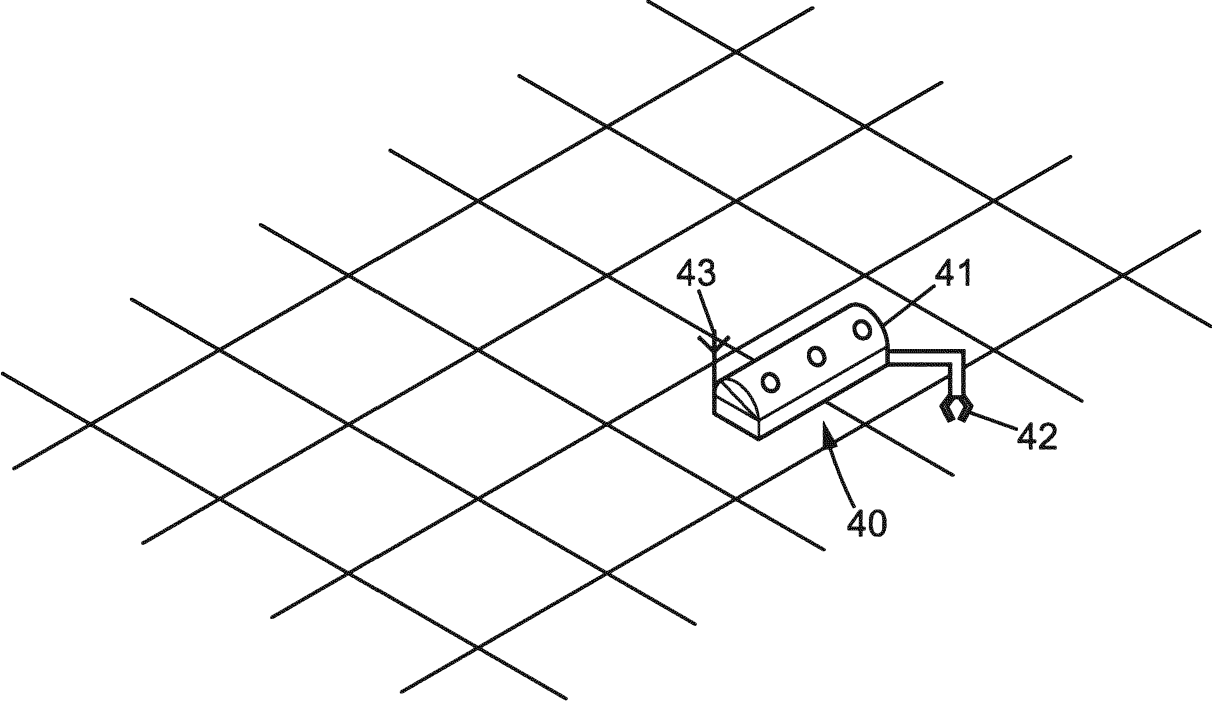


FIG. 7

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 (nouveau) 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

☒ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ 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.

☒ 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

US 2006/207189 A1 (PRYOR MARK K [US] ET AL) 21 septembre 2006 (2006-09-21)

US 2002/112417 A1 (BROWN MICHAEL A [US] ET AL) 22 août 2002 (2002-08-22)

US 2012/292449 A1 (LEVIN EUGENE M [US] ET AL) 22 novembre 2012 (2012-11-22)

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