



(51) Classification internationale des brevets :
B29C 67/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2015/051446

(22) Date de dépôt international :
2 juin 2015 (02.06.2015)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1455131 5 juin 2014 (05.06.2014) FR

(71) Déposants : INRIA INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE [FR/FR]; Domaine de Voluceau - Rocquencourt, F-78150 Le Chesnay (FR). UNIVERSITÉ DE LORRAINE [FR/FR]; 34 cours Léopold CS 25233, F-54052 NANCY Cedex (FR).

(72) Inventeurs : LEFEBVRE, Sylvain; 73 rue Herbue Chalin, F-54840 Velaine-en-Haye (FR). DUMAS, Jérémie; 12 impasse du canal, F-13710 Fuveau (FR). HERGEL, Jean; 240 avenue du Général Leclerc, F-54000 Nancy (FR).

(74) Mandataire : CABINET NETTER; 36 avenue Hoche, F-75008 Paris (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(54) Title : SUPPORT STRUCTURE FOR SUPPORTING AN OBJECT DURING THE MANUFACTURE OF SAME BY MEANS OF AN ADDITIVE MANUFACTURING METHOD; METHOD FOR GENERATING SUCH A STRUCTURE

(54) Titre : STRUCTURE DE SUPPORT D'UN OBJET AU COURS DE SA FABRICATION PAR UN PROCÉDE DE FABRICATION ADDITIVE : PROCÉDE DE GENERATION D'UNE TELLE STRUCTURE

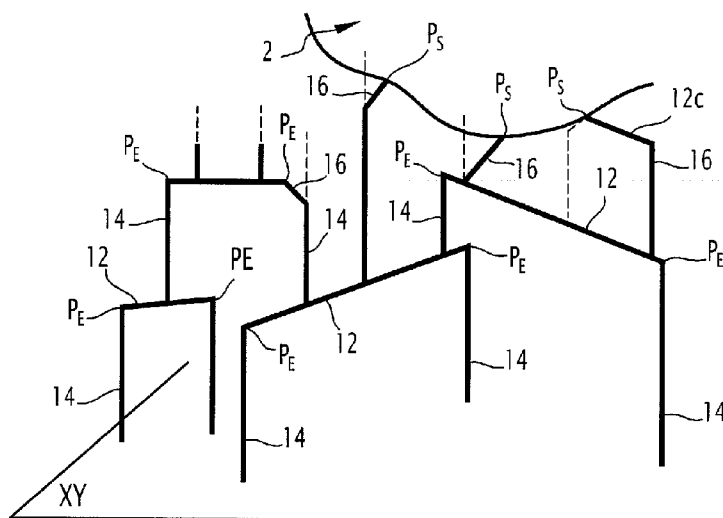


FIG.3

(57) Abstract : A support structure for supporting an object during the manufacture of same by means of an additive manufacturing method; method for generating such a structure. This support structure (10) for supporting an object (2) during the manufacture of same by means of an additive manufacturing method, the support structure and the object being manufactured simultaneously, consists of a plurality of horizontal and straight bridges (12), vertical pillars (14) and inclined connectors (16), a bottom end of a pillar resting on a bridge, on a base plane or on a point of a surface of the object, and a top end of a pillar carrying a connector, and a bottom end of a connector resting on the top end of a pillar and the top end of a connector corresponding to a point on the surface of the object or to a point to be supported of a bridge, each bridge being supported at least at each of the two end points of same, either by a connector or by a point of the object, and the pillars and connectors being capable of having a height of zero.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]



Structure de support d'un objet au cours de sa fabrication par un procédé de fabrication additive; procédé de génération d'une telle structure. Cette structure de support (10) pour supporter un objet (2) au cours de sa fabrication par un procédé de fabrication additive, la structure de support et l'objet étant fabriqués simultanément, est composée d'une pluralité de ponts (12) horizontaux et rectilignes, de piliers (14) verticaux et de connecteurs (16) inclinés, une extrémité inférieure d'un pilier reposant sur un pont, sur un plan de base ou sur un point d'une surface de l'objet, et une extrémité supérieure d'un pilier portant un connecteur, et une extrémité inférieure d'un connecteur reposant à l'extrémité supérieure d'un pilier et l'extrémité supérieure d'un connecteur correspondant à un point à la surface de l'objet ou à un point à supporter d'un pont, chaque pont étant supporté au moins à chacun de ses deux points d'extrémité, soit par un connecteur soit par un point de l'objet, et les piliers et connecteurs pouvant présenter une hauteur nulle.

Structure de support d'un objet au cours de sa fabrication par un procédé de fabrication additive ; procédé de génération d'une telle structure.

L'invention a pour domaine celui des structures de support pour supporter un objet au cours de sa fabrication par la mise en œuvre d'un procédé de fabrication additive, la structure de support et l'objet étant imprimés simultanément.

Un procédé de fabrication additive consiste à ajouter des couches de matière pour réaliser l'objet par dépôts successifs de matière.

Parmi les procédés de fabrication additive, l'impression 3D et, en particulier, l'impression 3D à filament, aussi dénommée impression FFF selon l'acronyme anglais « Fused filament fabrication », connaît un essor important, notamment pour les phases de conception d'un objet, avant sa mise en production.

Plus précisément, un filament de matière, généralement un plastique, est forcé à travers une buse chauffante et mobile. Au cours du déplacement de la buse le long d'un chemin prédéterminé dans un plan horizontal XY, le filament fondu, extrudé de la buse, est déposé sur la matière de la couche précédente et s'y soude, créant ainsi une épaisseur supplémentaire. De proche en proche, par couches successives, l'objet est fabriqué.

L'impression 3D à filament présente un prix de revient faible, aussi bien pour l'imprimante, que pour la matière première. Elle est également d'une grande facilité d'utilisation, car elle ne nécessite que quelques étapes supplémentaires avant et après l'impression proprement dite. En amont, il s'agit de générer un fichier de données décrivant géométriquement l'objet à imprimer au moyen d'un logiciel de CAO adapté, puis de déterminer automatiquement les chemins que doit suivre la buse d'impression pour déposer de la matière afin de réaliser cette géométrie. En aval, il s'agit de séparer l'objet du plateau de l'imprimante sur laquelle il a été fabriqué.

Cependant, un problème général des procédés de fabrication additive, en particulier des procédés d'impression 3D, de stéréolithographie ou autres, réside dans le fait que la matière d'une couche doit nécessairement être déposée sur une surface existante, que ce soit, pour la première couche, le plateau sur lequel l'objet est fabriqué ou, pour une autre couche, la couche de matière précédente.

En conséquence, il n'est a priori pas possible de réaliser directement par un procédé de fabrication additive, un objet comportant des portions en surplomb.

Pour contourner cette limitation des procédés de fabrication additive, il est nécessaire d'étayer les portions en surplomb de l'objet par un support adapté, de

manière à ce que la matière d'une couche soit supportée et que la portion en surplomb puisse être fabriquée.

Avantageusement, le support est une structure de support qui est fabriquée en même temps que l'objet lui-même et qui est séparée de celui-ci à l'issue de la fabrication, dans une étape aval du processus de fabrication.

Ainsi, pour un procédé d'impression 3D à filament, il convient, dans une étape amont, suite à la génération de la géométrie de l'objet à imprimer au moyen d'un logiciel de CAO et avant de déterminer les chemins que doit suivre la buse pour déposer la matière et réaliser cette géométrie, d'élaborer une structure de support de l'objet.

Des procédés d'élaboration d'une structure de support sont connus.

Un premier procédé conduit à l'élaboration d'une structure de support robuste. Un tel procédé consiste d'abord à extruder les surfaces à supporter de l'objet vers le bas jusqu'au plateau de l'imprimante, de manière à définir un volume d'extrusion. Puis, ce volume d'extrusion est rempli en utilisant un motif de remplissage. Le motif de remplissage est par exemple un motif en nid d'abeilles. Ce motif est prédéterminé et ne s'adapte pas à l'objet supporté.

Dans un second procédé, qui conduit également à l'élaboration d'une structure de support, la structure de support est un treillis volumique régulier dont seules les arêtes situées dans le volume d'extrusion sont conservées, les arêtes touchant l'objet ou situées au dessus étant supprimées. Une étape supplémentaire consiste à supprimer des arêtes à l'intérieur de volume d'extrusion pour encore simplifier la structure de support. La structure de support est donc toujours un sous-ensemble du treillis régulier d'origine.

La géométrie de la structure de support obtenue au moyen de ces procédés est donc en partie indépendante de l'objet à imprimer, puisque les éléments constituant le treillis ainsi que leurs positions sont prédéterminés par le motif de treillis choisi à l'origine. En particulier, ces éléments ne peuvent pas se positionner ou s'orienter localement en fonction de la géométrie de l'objet à supporter ce qui conduit à une structure de support plus importante. De plus, afin de garantir qu'une telle structure de support reste imprimable il est nécessaire de garder des colonnes, qui sont constituées d'un ensemble d'arêtes formant des structures minimales imprimables, ce qui limite la réduction maximale possible et complexifie l'algorithme de suppression des arêtes du treillis.

Un troisième procédé, dont les détails algorithmiques sont gardés secrets, conduit à l'élaboration d'une structure de support arborescente. Une telle structure de support étayant une figurine est illustrée par la figure 1. Une structure de support arborescente est représentée schématiquement à la figure 2, les points d'extrémités, constituant les « feuilles » de l'arbre, étant les points à supporter à la surface de l'objet à imprimer.

Une structure de support arborescente est légère. Elle ne nécessite que peu de matière première, et, par conséquent, un temps d'impression réduit.

Cependant, ce second type de procédé n'est pas déterministe et conduit, à partir d'un même objet, à déterminer plusieurs structures de support arborescentes possibles.

5 Or, certaines de ces structures possibles ne sont pas mécaniquement stables : elles ne sont pas suffisantes pour supporter l'objet au cours de sa fabrication et les portions en surplomb sont susceptibles de s'affaisser au cours de l'impression, conduisant à la fabrication d'un objet présentant des défauts.

10 Pour choisir la bonne structure de support arborescente, il faut soit procéder à une simulation mécanique complexe, dont les paramètres exacts sont très difficiles à déterminer, soit procéder à des essais d'impression avec différentes structures arborescentes possibles, et choisir celle ayant conduit à la fabrication d'un objet présentant le moins de défaut. Une telle méthode du type essai/erreur n'est pas efficace dans le domaine de l'impression 3D. Elle conduit notamment à une consommation de
15 matière première importante et à des temps d'impression élevés. Elle demande de plus une formation spécifique des opérateurs concevant les structures de support.

L'invention a donc pour but de pallier les problèmes précités, en proposant notamment un procédé automatique d'élaboration d'une structure de support pour un objet à réaliser au moyen d'un procédé de fabrication additive, qui soit mécaniquement
20 robuste tout en restant légère, c'est-à-dire ne nécessitant qu'une quantité réduite de matière et un temps d'impression réduit, l'élaboration consistant, d'abord, à définir des points de l'objet à supporter, puis, à générer une structure de support à partir de ces points à supporter

L'invention a pour objet une structure de support pour supporter un objet au cours
25 de sa fabrication en mettant en œuvre un procédé de fabrication additive, la structure de support et l'objet étant fabriqués simultanément, caractérisée en ce qu'elle est composée d'une pluralité de ponts horizontaux et rectilignes, de piliers verticaux et de connecteurs inclinés, une extrémité inférieure d'un pilier reposant sur un pont, sur un plan de base ou sur un point d'une surface de l'objet, et une extrémité supérieure d'un pilier portant un
30 connecteur, et une extrémité inférieure d'un connecteur reposant à l'extrémité supérieure d'un pilier et l'extrémité supérieure d'un connecteur correspondant à un point à la surface de l'objet ou à un point à supporter d'un pont, chaque pont étant supporté au moins à chacun de ses deux points d'extrémité, soit par un connecteur soit par un point de l'objet, et les piliers et connecteurs pouvant présenter une hauteur nulle.

Suivant des modes particuliers de réalisation, la structure de support comporte une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :

- un pont supporte, via des piliers et/ou des connecteurs, une pluralité de n points, et est supporté par p points, n étant strictement supérieur à p .
- un connecteur fait un angle inférieur à un angle maximal $\alpha_{0\max}$ prédéterminé et possède une hauteur inférieure à une hauteur maximale $h_{0\max}$ prédéterminée.
- chaque pont suit, dans un plan horizontal, une direction choisie dans un ensemble de directions possibles.
- l'ensemble des directions possibles comporte d directions, faisant de préférence un angle de π/d entre elles.
- un procédé de fabrication additive du type impression 3D à filament étant mis en œuvre, un pont est constitué par au moins un filament imprimé entre deux points de support, lesdits deux points de support correspondant chacun à l'extrémité supérieure d'un connecteur ou à un point à la surface de l'objet.
- une distance entre les points de support d'un pont est inférieure à une portée maximale $D_{\max}$.
- un pont est constitué de deux couches, chaque couche étant constituée de deux filaments disposés côte à côte.
- chaque pilier et/ou chaque connecteur présente une section transversale en forme de croix.
- un point à la surface de l'objet correspond à l'extrémité supérieure d'un connecteur ou à l'extrémité d'un pont est un point à supporter de l'objet.

L'invention a également pour objet un procédé de génération automatique d'une structure de support pour un objet à fabriquer en mettant en œuvre un procédé de fabrication additive, notamment un procédé d'impression 3D à filament, l'objet et le support étant fabriqués simultanément, caractérisé en ce que, la structure étant conforme à la structure précédente, le procédé comporte les étapes consistant à : initialiser un ensemble de points à supporter à partir de points à la surface de l'objet ; puis, pour chaque direction d'un ensemble de directions de balayage horizontale, déplacer un plan de balayage orthogonalement à la direction de balayage courante ; et, lorsque le plan de balayage coïncide avec un point à supporter, créer un pont possible dans le plan de balayage supportant les points à supporter dudit ensemble des points à supporter qui vérifient un critère de distance au plan de balayage ; pour chaque pont possible créé lors du balayage selon la direction de balayage courante, calculer une valeur d'une fonction de coût pour la fabrication dudit pont possible ; sélectionner un meilleur pont possible

parmi les ponts possibles sur la base de la valeur calculée de la fonction de coût ; soustraire de l'ensemble des points à supporter, les points supportés par le meilleur pont possible et ajouter au moins les deux extrémités du meilleur pont possible à l'ensemble des points à supporter ; placer dans un fichier de description de la structure de support des informations géométriques relatives aux composants de la structure de support associés aux points supportés par le meilleur pont possible.

Suivant des modes particuliers de réalisation, le procédé comporte une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :

- le procédé comportant en outre une étape consistant à définir un ensemble de segments, à associer au moins un segment à chaque point à supporter de l'ensemble des points à supporter, un point à supporter faisant partie des points supportés par un pont possible lorsque le plan de balayage coupe ledit au moins un segment associé.

- l'étape consistant à définir un ensemble de segments à partir des points de l'ensemble des points à supporter, consiste à définir : pour chaque point de l'ensemble des points à supporter, un segment d'un premier type, qui est parallèle à la direction de balayage, centré sur le point considéré, et possède une première longueur prédéfinie ; et/ou pour chaque point de l'ensemble des points à supporter qui correspondent à un point d'extrémité d'un pont, un segment d'un second type, qui est parallèle audit pont, s'étend au-delà du point d'extrémité correspondant, sur une seconde longueur, qui dépend d'une portée maximale pour les ponts qu'il est possible de fabriquer.

- l'étape consistant à calculer une fonction de coût consiste à calculer une fonction de gain permettant de ne retenir que les ponts possibles qui permettent de soutenir au moins $\underline{n}$ points de l'ensemble des points à supporter, $\underline{n}$ étant un entier supérieur au nombre $\underline{p}$ de points supportant le pont possible considéré.

- la fonction de gain G prend la forme : $G = (n-2) \times h - l$, où $\underline{h}$ est une hauteur maximale du pont possible et $\underline{l}$ une longueur minimale du pont possible.

- l'étape consistant à calculer une fonction de coût consiste à calculer une fonction de score permettant de sélectionner, parmi les ponts possibles ayant un gain positif, le meilleur pont possible comme le pont possible ayant la plus grande valeur de la fonction de score.

- la fonction de score F prend la forme: $F = G - n \times l_{\max}$, où G est le gain calculé et $l_{\max}$ est la plus grande des hauteurs parmi les hauteurs des $\underline{n}$ piliers verticaux connectant le pont possible à un point à supporter.

- les étapes sont itérées sur une pluralité de directions horizontales différentes, faisant de préférence un angle de π/d entre elles.

- le procédé comporte une étape de vérification qu'un pont possible ne rentre pas en collision avec l'objet à fabriquer.

- le procédé comporte une étape de vérification qu'un pont possible ne dépasse pas une portée maximale pour les ponts qu'il est possible de fabriquer compte tenu du procédé de fabrication additive mis en œuvre.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre d'un mode de réalisation particulier, donné uniquement à titre illustratif et non limitatif, et faite en se référant aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une représentation graphique d'un objet imprimé avec une structure de support arborescente selon l'art antérieur ;

- la figure 2 est une représentation schématique d'une structure de support arborescente selon l'art antérieur, les points d'extrémités, constituant les « feuilles » de l'arbre, étant les points à supporter à la surface de l'objet à imprimer ;

- la figure 3 est une représentation schématique d'une structure de support selon l'invention ;

- la figure 4 est une représentation sous forme de blocs d'un procédé de définition de l'ensemble des points à supporter à la surface de l'objet, quelle que soit la nature de la structure de support finale supportant les points à supporter ainsi définis (structure selon l'art antérieur, par exemple arborescente, ou selon l'invention) ;

- les figures 5a à 5c représentent un objet monobloc dont la fabrication par un procédé de fabrication additive passe par la formation de sous-objets intermédiaires, le procédé de définition de l'ensemble des points à supporter selon l'invention permettant d'étayer chaque sous-objet ;

- la figure 6 est une représentation schématique en perspective des points utilisés dans le procédé de la figure 4 ;

- la figure 7 est une représentation sous forme de blocs d'un procédé de génération automatique d'une structure de support selon l'invention, à partir de la donnée d'un ensemble de points à supporter à la surface de l'objet à imprimer, que cet ensemble résulte ou non de la mise en œuvre du procédé de définition d'un ensemble de points à supporter selon la figure 4 ;

- la figure 8 est une illustration des notions de « segment » et d'« évènement » utilisées dans le procédé de la figure 7 ;

- la figure 9 est une illustration d'un pont possible ;

- la figure 10 est une représentation schématique d'un élément sensiblement vertical, pilier ou connecteur, de la structure de support selon l'invention comportant une portion inférieure verticale et une portion supérieure inclinée, et,

- la figure 11 est une représentation graphique de l'objet de la figure 1 avec une structure de support selon l'invention.

Dans la description qui va suivre, le procédé de fabrication additive qu'il est envisagé de mettre en œuvre pour fabriquer l'objet et sa structure de support est un procédé d'impression 3D à filament. L'homme du métier saura comment adapter l'enseignement technique de la présente description à d'autres types de procédé de fabrication additive.

Structure de support

La mise en œuvre du procédé selon l'invention conduit à l'élaboration d'une structure de support propre, dans une étape finale de fabrication au moyen d'une imprimante 3D à filament, à être imprimée avec l'objet de manière à le soutenir à chaque instant de son impression.

Une structure de support 10 est illustrée sur la figure 3. Est représenté sur la figure 11 le cas de l'impression d'un objet 2 représentant une figurine, identique à celle de la figure 1, étayé avec la structure de support selon l'invention.

La surface de l'objet 2 est référencée de manière générale par le chiffre 4.

La structure de support 10 vient étayer l'objet 2 en une pluralité de points à supporter P_s situés sur la surface 4 de l'objet 2.

La structure de support 10 comporte une pluralité de ponts 12, de piliers 14 et de connecteurs 16.

Un pont 12 est un composant horizontal et rectiligne.

Un pont présente une longueur l entre ses deux points d'extrémité, et une hauteur h au-dessus du plan de base constitué par le plateau de l'imprimante 3D à filament. Dans ce qui suit le plateau de l'imprimante est identifié à un plan de base horizontal XY, la normale à ce plan constituant l'axe Z des cotes.

Un pont 12 est supporté au moins à chacun de ses deux points d'extrémité. Dans le mode de réalisation décrit ici en détail, un pont 12 est supporté uniquement à chacun de ses deux points d'extrémité. Cependant, dans une variante de réalisation de la structure de support, un pont peut être supporté non seulement à chacun de ses deux points d'extrémité, mais également en au moins un autre point intermédiaire.

Un pont est de trois types possibles : soit il est supporté à chacun de ses deux points d'extrémité par des piliers 14 ; soit il est supporté en un point d'extrémité par un pilier 14 et l'autre point d'extrémité correspond à un point situé à la surface 4 de l'objet 2 ; soit encore chacun de ses deux points d'extrémité correspondent à des points situés à la

surface 4 de l'objet 2. Il est à noter ici qu'un point à la surface de l'objet n'est pas forcément un point à supporter à la surface de l'objet tel que défini plus bas en relation avec les procédés selon l'invention. Ce sera uniquement le cas si ces points proviennent d'une analyse de stabilité comme décrite ci-dessous. Cependant, l'algorithme de mise en œuvre du procédé de génération de la structure peut décider, si on l'y autorise, d'ancrer un pont sur la surface de l'objet, en tout point de celle-ci, pour éviter de former un pilier.

Les ponts du second et troisième types sont dénommés « ponts connecteur » dans ce qui suit. Ils sont indiqués par la référence 12C, comme par exemple sur la figure 5. Sauf mention explicite, un pont 12 est un pont du premier type. En variante, la structure ne comporte que des ponts du premier type.

Un pilier 14 est orienté verticalement. Il prend appui, par son extrémité inférieure, soit directement sur un pont 12, soit directement sur le plan de base, soit encore directement sur la surface 4 de l'objet 2.

Un pilier 14 supporte, indirectement, par l'intermédiaire d'un connecteur 16, soit un point d'extrémité P_e d'un pont 12, soit un point à supporter P_s à la surface 4 de l'objet 2.

Comme représenté sur la figure 7, un connecteur forme un angle α_0 inférieur à un angle maximum α_{0max} et possède une hauteur h_0 inférieure à une hauteur h_{0max} . De manière générale, ces deux paramètres sont contraints simultanément pour ne pas qu'un connecteur 16 ne dépasse un angle d'inclinaison maximum qui risquerait de présenter une résistance mécanique faible et d'être difficilement imprimable.

Il est à noter qu'un pilier 14 peut avoir une hauteur nulle, de sorte qu'un pont 12 situé plus haut repose directement sur un pont 12 situé plus bas, ou qu'un connecteur 16 prend appui par son extrémité inférieure directement sur un pont.

Un connecteur 16 peut également avoir une hauteur nulle, de sorte qu'un pilier 14 supporte un point qui est situé directement à la verticale du point du pont sur lequel prend appui le pilier considéré.

Comme représenté sur la figure 10, un pont 12 supporte directement au moins n piliers 14 (un pilier pouvant avoir une hauteur nulle), c'est-à-dire supporte n points à supporter parmi des points d'extrémité de ponts 12 situés plus haut ou des points à supporter P_s à la surface 4 de l'objet 2.

L'intérêt d'un pont 12 étant de réduire le nombre de points à supporter P , en substituant aux n points qu'il supporte, les p piliers 14 qui le supportent, il est souhaitable que l'entier n soit supérieur à l'entier p . Dans le mode de réalisation décrit ici en détail, p étant égal à 2, il est souhaitable que n soit supérieur ou égal à 3. Cette contrainte est implémentée par une fonction de gain G adaptée dans le procédé de génération de la structure de support, qui sera décrit ci-après.

Dans une variante de réalisation, si les piliers sont trop hauts, il est préférable d'ajouter un pont intermédiaire de rigidification. Un tel pont supporte un pilier vertical et est supporté par deux piliers verticaux. Ceci permet de rigidifier la structure et d'éviter des phénomènes de flambage d'un pilier qui serait trop haut.

5 Les ponts 12 et les ponts connecteurs 12C sont, en vue de dessus, c'est-à-dire en projection dans un plan horizontal XY correspondant au plan de base, distribués selon d directions. Par direction, on entend les deux sens possibles le long d'une droite. De préférence, les directions se déduisent les unes des autres par rotations de π/d .

10 Dans le cas de l'utilisation d'une imprimante 3D à filament, un pont 12 est constitué par au moins un filament imprimé entre deux points d'extrémité à supporter constitués par les extrémités supérieures des deux piliers 14 supportant le pont 12 considéré. De manière similaire, un pont connecteur 12C est constitué par au moins un filament imprimé entre deux points à supporter constitués par un point à supporter P_s de la surface 4 de l'objet 2 et l'extrémité supérieure du pilier 14 qui le supporte.

15 Il a été constaté qu'il est possible d'utiliser une imprimante 3D à filament pour étirer un filament de matière au-dessus d'un vide entre deux points de support dont la distance est inférieure à une portée maximale $D_{\max}$ de quelques centimètres. Le filament chaud est extrudé de manière à se souder aux deux points de support en formant entre ces deux points une chaînette. Lorsque le filament refroidit, le matériau du filament se rétracte de
20 manière à former un pont sensiblement horizontal.

Ainsi, dans le mode de réalisation actuellement envisagé, un pont 12 (respectivement 12C) est constitué de deux couches successives.

Chaque couche présente une épaisseur de 0,4 mm. Elle est constituée de deux filaments disposés côte à côte, à une distance de 0,8 mm l'un de l'autre, distance qui
25 correspond sensiblement au diamètre du filament utilisé.

Les ponts 12 (respectivement 12C) ainsi formés présentent des propriétés mécaniques suffisantes pour servir de composant élémentaire d'une structure de support d'un objet. Il a ainsi été constaté qu'un pont 12 (respectivement 12C) peut supporter à lui
30 seul plusieurs grammes. Or, les objets à imprimer utilisent souvent moins de 10 m de filament (pour un filament de 1,75 mm de diamètre, cela représente un objet d'environ 25 g) et sont étayés par une structure de support comportant plusieurs ponts. L'objet est donc correctement supporté mécaniquement.

Chaque élément vertical, pilier 14 ou connecteur 16, présente de préférence une section transversale en forme de croix. Une telle section permet à la fois une
35 consommation réduite de matière première et donc une impression rapide, tout en offrant une bonne rigidité. Bien évidemment, d'autres choix de section sont envisageables.

La structure de support 10 de l'objet 2 de la figure 3 pèse 0,5 g, alors que l'objet lui-même pèse environ 10 g.

Procédé de définition de l'ensemble des points de contact à soutenir

5 Va maintenant être décrit un procédé permettant la définition d'un ensemble E0 de points à supporter à la surface d'un objet à fabriquer.

Ce procédé 100 de définition, qui constitue un premier aspect de l'invention, est indépendant du procédé de génération de la structure de support, qui sera effectivement utilisé par la suite, en particulier du procédé 200 de génération décrit ci-dessous et
10 constituant un second aspect de l'invention.

Ainsi la mise en œuvre du procédé 100 conduit à la définition d'un ensemble E0 de points à supporter P_s à la surface 4 de l'objet 2. L'ensemble E0 regroupe les points de la surface 4 de l'objet 2 devant être étayés par la structure de support 10.

Incidentement, un pilier 14 de la structure de support 10 pouvant prendre appui soit
15 sur un pont 12, soit sur le plan de base XY, soit encore sur la surface 4 de l'objet 2 lui-même, l'ensemble des points de contact entre la structure de support 10 et l'objet 2 comporte non seulement l'ensemble E0 des points à supporter P_s , mais également les points de la surface 4 de l'objet 2 sur lesquels prennent appui certains des piliers 14 de la structure de support 10.

20 Avantageusement, le procédé 100 permet de définir un ensemble E0 qui, par la mise en œuvre d'une première série d'étapes 102, permet de soutenir le filament au cours de l'impression, et qui, par une seconde série d'étapes 104, permet d'assurer la stabilité de l'objet à chaque instant de l'impression.

Pour cela le procédé 100 comporte une première série d'étapes consistant à
25 déterminer des points à supporter P_s qui ensemble permettent de soutenir le filament au cours de l'impression.

Dans une étape 112, l'objet 2 à imprimer est subdivisé en couches horizontales, chaque couche C_i correspondant à l'épaisseur de matière déposée à chaque passage de la buse de l'imprimante 3D à filament. A cette étape, seul l'objet 2 est considéré. L'indice i
30 correspond à un pas le long de l'axe Z des cotes.

Les étapes suivantes sont itérées pour chaque couche C_i , c'est-à-dire sur l'entier i. Celui-ci n'est pas rappelé à chaque étape pour ne pas alourdir les notations.

A l'étape 114, pour chaque couche C_i , les chemins ch_j suivis par la buse pour imprimer la couche considérée sont déterminés. Les chemins sont soit du type chemin de
35 périmètre, lorsqu'ils appartiennent au bord formant le périmètre de la couche C_i , soit du

type chemin interne, lorsqu'ils appartiennent à l'intérieur de la couche C_i , c'est-à-dire à la couche C_i de laquelle a été retirée le bord formant son périmètre.

A l'étape 116, chaque chemin ch_j est décomposé en chemins élémentaires che_{jk} , chaque segment s'étendant entre deux points anguleux successifs du chemin, c'est-à-dire deux points où il y a un changement significatif de la direction de déplacement de la buse. Lorsque la longueur d'un chemin élémentaire est supérieure à une longueur seuil l_0 (de 5 mm par exemple), il est subdivisé en autant de segments élémentaires. La longueur seuil l_0 constitue un paramètre ajustable du procédé.

A l'étape 118, les points d'extrémité des chemins élémentaires che_{jk} sont placés dans une première liste L1. La liste L1 est ordonnée en fonction du cheminement de la buse pour imprimer la couche C_i courante.

L'étape 120 consiste à vérifier que chaque point P1 de la première liste L1 est supporté par la couche C_{i-1} , située immédiatement au-dessous de la couche C_i courante.

Cette vérification consiste à calculer la fraction de la surface d'un disque $D(P1)$ supportée par la couche C_{i-1} , ce disque étant centré sur le point P1 et possédant un rayon prédéfini, correspondant par exemple au diamètre de la buse (0,4 mm dans la mise en œuvre pratique du présent procédé).

Si plus d'un pourcentage seuil (prédéfini et réglable), par exemple égal à 50%, de la surface du disque $D(P1)$ n'est pas supportée par la couche précédente, le point P1 est considéré comme étant un point non-supporté. Il est rentré dans une seconde liste L2, qui est ordonnée selon le cheminement de la buse pour imprimer la couche C_i .

A l'étape 122, la seconde liste L2 est parcourue. Si un point P2 de la liste L2 appartient à un chemin ch_j du type périmètre, il est sélectionné dans l'ensemble E0 des points à supporter P_s , si la distance entre le point P2 et un point voisin PV (défini comme le point de l'ensemble E0 appartenant à la couche C_i le plus proche du point P2 considéré) est supérieure à une distance seuil τ , les distances étant ici des distances curvilinéaires évaluées le long du chemin considéré.

En revanche, si le point P2 de la liste L2 appartient à un chemin ch_j du type interne, le point non-supporté P2 est sélectionné dans l'ensemble E0 des points à supporter, si la distance entre le point P2 et un point voisin PV (défini alors comme le point de l'ensemble E0 appartenant à la couche C_i considérée ou à une couche inférieure, C_j avec $j < i$, le plus proche du point P2 considéré) est supérieure à la distance seuil τ , les distances étant dans cette seconde alternative des distances rectilinéaires.

A l'issue de l'étape 122, l'ensemble E0 des points à supporter est déterminé.

Ainsi, à l'issue de cette première série d'étapes 102, un ensemble de points à supporter est défini qui permet de garantir le maintien du filament au cours de l'impression

de l'objet. En variante, d'autres séries d'étapes pourraient être mises en œuvre pour déterminer un tel ensemble de points à supporter garantissant le maintien du filament au cours de l'impression.

Le procédé 100 se poursuit avantageusement par une seconde série d'étapes 104 consistant à compléter un ensemble de points à supporter, avec des points supplémentaires situés sur la surface 4 de l'objet 2, de manière à garantir la stabilité de l'objet 2 à chaque instant de son impression. L'ensemble des points à supporter considéré au début de cette seconde série d'étapes est avantageusement l'ensemble E0 des points à supporter défini lors de la première série d'étapes présentée ci-dessus.

L'impression couche par couche d'un objet 2 monobloc passe souvent par l'impression de sous-objets 2_n intermédiaires qui sont indépendants à une certaine hauteur et qui sont soudés ensemble à une hauteur plus élevée. Ceci est illustré sur la figure 5 par un objet 2 en forme de dôme, dont les quatre sous-objets 2_n en forme de jambage ne sont reliés les uns aux autres qu'au moment de l'impression de la clé de voute.

Chaque sous-objet 2_n peut être instable avant d'être assemblé à un autre sous-objet pour former l'objet 2. Un sous-objet 2_n peut donc éventuellement tomber ou basculer, conduisant à une impression défectueuse. Ce problème est un problème générique de la fabrication additive. Il est notamment présent dans les procédés de stéréolithographie.

La mise en œuvre du procédé effectue une analyse permettant d'évaluer, à chaque couche C_i de matière ajoutée par l'imprimante 3D à filament, la stabilité d'au moins un sous-objet 2_n imprimé jusque-là.

Il est à souligner que le procédé ne prend pas en compte la possibilité d'utiliser un agent de liaison afin de coller l'objet à imprimer sur le plateau de l'imprimante. Mais l'utilisation d'une telle colle ne peut qu'améliorer la stabilité des éventuels sous-objets de l'objet.

De plus, il est fait l'hypothèse que ledit sous-objet est rigide.

Vérifier qu'un sous-objet 2_n posé sur le plan de base XY est en équilibre statique stable, consiste à vérifier si son centre de masse $C_{m,n}$ se projette verticalement en un point M_n situé à l'intérieur d'une surface de base B_n du sous-objet 2_n .

La surface de base B_n d'un sous-objet 2_n est la surface polygonale convexe la plus petite comportant tous les points du sous-objet 2_n en contact avec le plan de base XY.

Les étapes suivantes visent à augmenter la surface de base B_n d'un sous-objet 2_n instable, par l'ajout d'un pilier vertical 14 entre un nouveau point de contact P_C sur le plan de base XY et un nouveau point à supporter P_S à la surface 4 du sous-objet 2_n . Le

système mécaniquement stable est alors constitué par le sous-objet 2_n et le pilier vertical 14 ajouté.

Dans le présent mode de réalisation n'est considérée que la possibilité d'ajouter un pilier vertical 14 entre un point de contact P_C sur le plan de base XY et un point à supporter P_S à la surface du sous-objet. Cependant, lors de la détermination de la structure de support à imprimer, comme cela sera décrit ci-dessous en détail, ce point à supporter P_S sera peut être supporté non pas par un unique pilier vertical 14, mais par un groupe de piliers 14 et de ponts 12. Mais, l'ensemble des points de contact de ce groupe de piliers et de ponts sur le plan de base XY conduit à une augmentation de la surface de base B qui est plus grande et qui inclut l'augmentation de la surface de base B engendrée par l'unique point de contact P_C . Ceci découle du fait que la surface de base est par définition convexe et que les ponts sont toujours supportés à chacune de leurs deux extrémités par des piliers, de sorte que si le point à supporter P_S est supporté via un pont, un pilier de support de ce pont sera à l'extérieur de la surface de base déterminée en considérant la seule projection verticale du point à supporter P_S . Ainsi, en cours d'impression, la structure de support ne peut qu'améliorer la stabilité du sous-objet par rapport à l'utilisation d'un unique pilier vertical.

A l'étape 124, pour la couche C_i courante, pour le ou chaque sous-objet 2_n , la projection M_n sur le plan de base XY de son centre de masse $C_{m,n}$ est déterminée. Avantagement ceci est réalisé en tenant compte des chemins ch_i d'impression et non pas du seul volume délimité par la surface 4 du sous-objet 2_n . En effet, l'intérieur du sous-objet peut être plein, réalisé en nids d'abeilles, etc., ce qui influence la position du centre de masse $C_{m,n}$ et par conséquent celle du point M_n sur le plan de base XY.

L'équilibre statique d'un sous-objet peut être perturbé par les forces appliquées par la buse lors du dépôt de matière. C'est la raison pour laquelle, est vérifié si un disque $D(M_n)$, centré sur le point M_n et ayant un rayon R prédéfini, se situe intégralement à l'intérieur de la surface de base B_n du sous-objet 2_n .

Le rayon R du disque est par exemple égal à 3 mm. Dans une variante de réalisation le rayon du disque dépend de la distribution de masse autour du centre de masse et de la hauteur entre le centre de masse et le plateau, de manière à tenir compte d'un effet de bras de levier.

A l'étape 126, pour l'itération sur la couche C_i , une surface de base initiale $B_{n,0}$ (figure 6) est agrandie.

Lors de l'analyse de la première couche C_1 , la surface de base initiale $B_{n,0}$ est initialisée avec le polygone convexe minimal comportant tous les points de contact P_C de la première couche C_1 du sous-objet 2_n sur le plan de base XY.

A chaque itération, la surface de base initiale $B_{n,0}$ est d'abord agrandie en tenant compte, en tant que point de contact supplémentaire, de la projection sur le plan de base XY de chaque point à supporter P_S de l'ensemble E_0 et qui appartient à la couche C_i . Une surface de base augmentée $B_{n,1}$ est obtenue.

5 A l'étape 128 est alors vérifié si le disque $D(M_n)$ est entièrement compris à l'intérieur de la surface de base augmentée $B_{n,0}$.

Dans l'affirmative, le procédé passe à la couche suivante C_{i+1} et reprend à l'étape 114. Pour l'itération suivante, la surface de base initiale $B_{n,0}$ prend la valeur de la surface de base augmentée $B_{n,1}$.

10 Dans la négative, un point supplémentaire de la surface du sous-objet doit être ajouté à l'ensemble E_0 des points à supporter.

Dans un mode de réalisation particulier, un point supplémentaire est choisi de la manière suivante.

A l'étape 130, est déterminée une troisième liste L_3 de points de contact candidats PC_p . Un point de contact candidat de cette troisième liste est un point du plan de base correspondant à un point PS_p de la surface 4 du sous-objet 2_n qui se projette hors de la surface de base augmentée $B_{n,1}$ (ce point n'appartenant pas forcément à la couche C_i courante). Il est à noter que la surface de l'objet est échantillonnée ou pixélisée de sorte que la liste L_3 comporte un nombre fini de points.

20 En construisant un pilier vertical à partir de ce point candidat PC_p , pour étayer ce point PS_p de la surface du sous-objet 2_n il y a donc a priori possibilité d'augmenter la surface de base B_n du sous-objet étayé par ce pilier et de rendre le système correspondant stable.

25 Est en fait considéré un cercle $D(PC_p)$ de points candidats secondaires PCS_{pq} autour de chaque point candidat PC_p . Ce cercle présente un rayon égal au rayon R du disque $D(M_n)$, de manière à garantir que la surface de base B_n pourra être modifiée de manière à englober l'intégralité du disque $D(M_n)$.

30 A l'étape 132, pour chaque point candidat secondaire PCS_{pq} du cercle $D(PC_p)$ est déterminé le pourcentage de la surface du disque $D(M_n)$ qui serait englobée par la variation de la surface de base augmentée $B_{n,1}$, si ce point candidat secondaire PCS_{pq} constituait un point de contact du système. Les points PCS_{pq} associés aux différents points candidats PC_p de la liste L_3 sont placés dans une quatrième liste L_4 par ordre décroissant du pourcentage ainsi calculé. Là encore le périmètre du disque est échantillonné ou pixélisé de sorte que la liste L_4 comporte un nombre fini de points.

Puis, à l'étape 134, par itérations successives sur les points PCS_{pq} de la liste L4, la surface de base augmentée $B_{n,1}$ est agrandie pour obtenir une surface de base agrandie $B_{n,2}$.

A chaque intégration d'un nouveau point candidat secondaire PCS_{pq} , la surface de base est recalculée et l'on vérifie si la totalité du disque $D(M_n)$ se situe à l'intérieur de la surface de base recalculée.

Ce processus est stoppé lorsque la totalité du disque $D(M_n)$ se situe à l'intérieur de la surface de base recalculée, qui est alors mémorisée en tant que surface de base agrandie $B_{n,2}$. La liste L4 est alors tronquée de manière à ne retenir que les points candidats secondaires utilisés.

A cause de l'ordre de prise en compte des points dans la liste L4, il est possible que des points ajoutés dans les premières itérations ne contribuent finalement pas à la surface de base agrandie $B_{n,2}$, c'est-à-dire ne se situent pas sur le périmètre de cette surface de base modifiée, mais à l'intérieur de celle-ci. Ces points sont, à l'étape 136, retirés des points utilisés pour l'augmentation de la surface de base. Une cinquième liste L5 de points est alors obtenue à partir de la liste L4 tronquée.

La surface de base agrandie $B_{n,2}$ constitue la surface de base initiale $B_{n,0}$ pour l'itération suivante du procédé portant sur la couche suivante C_{i+1} .

La liste L5, constituée des points de contact sur le plan de base XY, est utilisée à l'étape 138 pour déterminer les nouveaux points P_s de la surface 4 du sous-objet 2_n à supporter pour garantir la stabilité au cours de l'impression.

Pour cela, à l'étape 138, pour chaque point PCS_{pq} de la liste L5, est calculé le point d'intersection entre une verticale issue du point PCS_{pq} considéré et la surface du sous-objet 2_n restreinte à la couche courante C_i et aux couches inférieures, C_j avec $j < i$.

Lorsqu'il existe, ce point d'intersection P_{sq} est ajouté à l'ensemble E0 en tant que nouveau point à supporter.

Si la verticale ne coupe pas la surface du sous-objet 2_n restreinte à la couche courante C_i , un pont connecteur 12C est ajouté dans un ensemble B0 de ponts connecteur. Ce pont connecteur 12C relie l'extrémité supérieure de la verticale issue du point PCS_{pq} considéré (extrémité se situant au niveau de la couche C_i courante) et un point P'_{sq} de la surface du sous-objet 2_n dont la projection verticale se trouve à l'intérieur du cercle $D(PC_p)$ sur le périmètre duquel se situe le point PCS_{pq} considéré.

Puis le procédé 100 boucle pour analyser la couche suivante C_{i+1} de l'objet.

A l'issue du procédé, est obtenu un ensemble E0 de points à supporter P_s à la surface de l'objet et un ensemble B0 de ponts, comportant des ponts connecteurs 12C.

Procédé de génération d'une structure de support

Le procédé de génération d'une structure de support constituant un second aspect de la présente invention prend en entrée un ensemble de points à supporter. Cet ensemble est avantageusement défini par la mise en œuvre du procédé présenté ci-dessus, mais peut être défini par n'importe lequel des procédés de l'état de la technique.

Le procédé 200 de génération d'une structure de support 10 de l'objet 2 débute ainsi par une étape 210 d'initialisation d'un ensemble E des points à supporter P, qui résulte de la réunion de l'ensemble E0 des points à supporter P_S à la surface 4 de l'objet 2, obtenu en sortie du procédé 100, et des points d'extrémité P_E libres de chaque pont connecteur 12C de l'ensemble B0, obtenu en sortie du procédé 100.

Plus généralement, le point d'extrémité P_E libre d'un pont est un point d'extrémité qui n'est pas encore supporté. Il s'agit donc d'un point constituant un degré de liberté dans la construction de la structure de support : il peut être déplacé en étirant le pont correspondant pour aller chercher un point d'appui situé dans son alignement vertical sur un pont situé plus bas, ou de manière optionnelle sur une partie de la surface de l'objet située dans son alignement vertical.

Le procédé se poursuit par une boucle 212 sur un ensemble de directions de balayage. Une direction de balayage dans le plan XY est perpendiculaire au plan de balayage correspondant qui est par conséquent vertical. De préférence, le procédé prend en compte un nombre d de directions de balayage.

Dans le mode de réalisation décrit ici en détail, ces directions sont séparées angulairement de π/d . En variante, l'ensemble des directions résulte d'une étape d'analyse géométrique de l'objet 2 pour déterminer s'il présente des directions privilégiées.

Pour des raisons de symétrie, il n'est pas nécessaire de considérer les directions au-delà de π . La direction $d=0$ correspond à la direction selon la direction X.

Pour des raisons de clarté, est décrit en détail ci-après le cas de l'itération où la direction de balayage correspond à l'axe X ($d=0$).

A l'étape 216, le procédé se poursuit par la création de segments à partir de chaque point à supporter P de l'ensemble E et de la direction de balayage courante, en l'occurrence la direction X.

Comme cela est représenté sur la figure 8, un segment d'un premier type Seg1 est généré à partir de chaque point de l'ensemble E qui est du type point à supporter P_S à la surface 4 de l'objet 2. Il s'agit d'un segment de longueur $2 \times l_{\max}$, parallèle à la direction de balayage courante et centré sur le point à supporter P_S .

Un segment d'un premier type Seg1 est également généré à partir de chaque point de l'ensemble E qui est du type un point d'extrémité P_E libre d'un pont 12, tel que le point P_{E1} du pont 12₁. Là encore il s'agit d'un segment de longueur $2 \times l_{\max}$, parallèle à la direction de balayage courante et centré sur le point d'extrémité P_E libre considéré du pont 12.

Un segment d'un second type Seg2 est généré à partir de chaque point de l'ensemble E qui est un point d'extrémité P_E libre d'un pont 12, tel que le point P_{E1} du pont 12₁. Il s'agit d'un segment parallèle à la direction du pont 12₁ et s'étendant à l'écart de celui-ci, au-delà du point d'extrémité libre P_{E1} .

Si les deux points d'extrémité du pont 12 sont libres, la longueur d'un segment Seg2 est telle que la somme de la longueur minimale du pont 12 et de la longueur du segment Seg2 est égale à la portée maximale $D_{\max}$ de fabrication d'un pont.

Il est à noter que la longueur minimale d'un pont 12 est la distance, évaluée selon la direction du pont, séparant les n points supportés par ce pont.

Si un seul point d'extrémité est libre, la longueur du segment Seg2 est telle que la somme de la longueur du pont 12 et de la longueur du segment Seg2 est égale à la portée maximale $D_{\max}$ de fabrication d'un pont.

Les segments construits à cette étape sont mémorisés dans un ensemble S.

A l'étape 218, le procédé se poursuit par la création d'évènements e associés aux segments de l'ensemble S. Un évènement est soit un point P de l'ensemble E (point P_S à la surface de l'objet ou point d'extrémité P_E libre d'un pont, éventuellement du type pont connecteur), soit une intersection P_i entre deux segments de l'ensemble S.

La liste des évènements est notée Q. Elle est ordonnée selon la valeur croissante de la coordonnée des évènements e selon la direction de balayage, en l'occurrence selon l'abscisse X des évènements.

Puis, le procédé rentre dans une boucle 220 portant sur les évènements e de la liste Q.

A chaque itération de la boucle 220, l'évènement courant e est retiré de la liste Q (étape 222), de sorte que le procédé sort de la boucle 220 lorsque la liste Q est vide.

A l'étape 224, le plan de balayage est placé sur l'évènement e .

Alors, tous les points P associés à des segments de l'ensemble S qui coupent (en des points d'intersections P_i) le plan de balayage sont placés dans une liste PP(e). Il s'agit des segments de la liste S qui, selon la direction de balayage, commencent avant l'évènement e et se termine après l'évènement e . En particulier, sont retenus les segments issus de l'évènement e courant. Une liste PP(e) est obtenue pour chaque

événement e de la liste Q . Chaque liste $PP(e)$ est ordonnée selon la coordonnée Y du plan de balayage.

Puis, à l'étape 226, pour chaque liste $PP(e)$, toutes les sous-listes $PPS(e)$ de points sont considérées. Si la liste $PP(e)$ correspond à l'ensemble $(P_0, \dots, P_i, \dots, P_n)$, seront alors considérées toutes les sous-listes $(P_j, \dots, P_k)$ telles que la distance, selon la direction Y , entre les points P_j et P_k est inférieure à la portée maximale $D_{\max}$.

Chaque sous-liste $PPS(e)$ est ensuite évaluée pour déterminer s'il est possible de construire un pont qui permettrait de soutenir tout ou partie des points P de cette sous-liste $PPS(e) = (P_j, \dots, P_k)$, par autant de piliers 14 et de connecteurs 16, issus de ce pont possible.

A l'étape 228, la hauteur de chaque point de la sous-liste $PPS(e) = (P_j, \dots, P_k)$ courante est diminuée d'une hauteur minimale $h_{\min}$ prédéterminée correspondant à la hauteur minimale d'un connecteur 16. Une liste de hauteurs possibles $(h_j, \dots, h_k)$ pour la sous-liste $PPS(e) = (P_j, \dots, P_k)$ est ainsi obtenue.

Puis, pour chaque hauteur de cette liste de hauteurs, est déterminé un pont possible $PPS(e, h)$ permettant de supporter les points de la liste $PPS(e)$; c'est à dire les points dont la hauteur est supérieure à la hauteur courante et qui sont atteignables par un connecteur.

A l'étape 230, il est vérifié qu'un pont possible et les éventuels ponts 14 et connecteurs 16 qu'il est susceptible de porter ne rentrent pas en collision avec l'objet 2 à imprimer.

L'évaluation se poursuit par une étape 232 de calcul d'une fonction de gain G permettant de quantifier l'intérêt de remplacer n piliers verticaux supportant les points de la liste $PPS(e, h)$ et prenant appui sur le plan de base XY , par un pont 14 supportant n piliers verticaux plus courts supportant les points de la liste $PPS(e, h)$, le pont prenant lui-même appui sur le plan de base XY par au moins deux piliers verticaux.

Dans le mode de réalisation actuellement envisagé, et comme cela est représenté sur la figure 9, un pont possible de longueur l et de hauteur h , supportant n éléments et supporté par deux piliers verticaux présente un gain G de :

$$G = (n-2) \times h - l$$

Avec une telle fonction de gain, seul le cas d'un pont possible supportant plus de deux piliers est favorable.

Dans une variante de réalisation, pour tenir compte du cas où une extrémité d'un pont possible est située au-dessus de l'objet, la longueur exacte du pilier vertical reliant cette extrémité à l'objet est utilisée à la place de la hauteur du pont mesurée par rapport au plan de base. Ainsi, la fonction de gain devient :

$$G = n \times h - h_1 - h_2 - l$$

où h_1 and h_2 sont les hauteurs exactes des piliers aux extrémités du pont possible.

Il est à noter que l'abaissement de la hauteur h d'un pont possible PPS(e,h) réduit son gain G , de sorte qu'un pont possible possède un gain maximal à la distance $h_{\min}$ au-dessous du point le plus bas qu'il supporte.

Ne sont finalement conservés que les ponts possibles PPS(e,h) dont le gain est positif ($G > 0$).

Puis à l'étape 234, une fonction de score F est calculée pour chaque pont possible PPS(e,h) de gain positif.

Dans le mode de réalisation actuellement envisagé, cette fonction de score est définie par :

$$F = G - n \times l_{\max}$$

où $l_{\max}$ est la plus grande des hauteurs parmi les hauteurs des différents piliers verticaux prenant appui sur le pont possible PPS(e,h) considéré, comme cela est illustré par la figure 9.

Une telle fonction de score F pénalise une distribution inhomogène des hauteurs des éléments verticaux prenant appui sur le pont possible PPS(e,h) considéré.

Une fois que tous les événements de la liste Q ont été considérés, à l'étape 236, le pont possible PPS(e,h) de gain positif ayant le score F le plus élevé (éventuellement un score négatif) parmi les ponts possibles déterminés lors du balayage selon la direction d courante, est sélectionné en tant que meilleur pont possible BPP pour cette itération du balayage.

A l'étape 238, les points P de la liste PPS(e,h) qui correspondent au meilleur pont possible BPP sont « gelés » et un fichier de description F10 de la structure de support 10 est mis à jour.

Pour un point P de la liste PPS(e,h) correspondant à l'intersection d'un segment du premier type Seg1 avec le plan de balayage, un pilier vertical 14 supplémentaire est ajouté dans le fichier F10.

Ce pilier 14 vertical connecte le point du meilleur pont possible (de hauteur h) correspondant à l'intersection, dans le plan XY, entre le segment Seg1 et le plan de balayage placé en $\underline{e}$.

Ce pilier 14 supporte éventuellement à son extrémité un connecteur 16 incliné pour couvrir la distance entre l'intersection, dans le plan XY, entre le segment Seg1 et le plan de balayage placé en $\underline{e}$ et le point de la liste PPS(e,h) correspondant à ce segment Seg1.

Pour un point P de la liste PPS(e,h) correspondant à un segment du second type Seg2, le pont 12 correspondant à ce segment Seg2 est prolongé jusqu'à la verticale du point d'intersection, dans le plan XY, du segment Seg2 et du plan de balayage placé en e. Un pilier vertical est alors prévu pour connecter le point du meilleur pont possible BPP correspondant à cette intersection et le point d'extrémité du pont 12 déplacé jusqu'à la verticale de ce point d'intersection. Si ce segment Seg2 correspond à un pont 12 dont l'autre extrémité est un point d'extrémité libre, la longueur du segment associé à cette autre extrémité est recalculée pour respecter la contrainte sur la portée maximale $D_{\max}$ d'un pont.

Ainsi un connecteur 16 apparaît comme un moyen permettant de relâcher la contrainte sur la distance, évaluée dans le plan XY, entre un point à supporter et un pont permettant de supporter ce point, ce pont appartenant au plan de balayage. En conséquence, il n'est pas nécessaire qu'un point à supporter soit strictement à la verticale d'un pont permettant de le supporter. Il suffit qu'il n'en soit pas trop loin pour qu'un connecteur 16 puisse connecter ce point à un pilier vertical issu de ce pont.

Le fichier F10 de la structure est ainsi mis à jour avec les informations disponibles pour les différents points « gelés ».

A l'étape 240, les différents points P supportés par le meilleur pont BPP= PS(e,h) sont supprimés de l'ensemble E des points à supporter. Sont en revanche ajoutés à l'ensemble E les points d'extrémité du meilleur pont BPP. Ces points d'extrémité libres correspondent à la longueur minimale $l_{\min}$ du meilleur pont BPP sélectionné compte tenu des n éléments qu'il supporte.

Le procédé est itéré avec une nouvelle direction de balayage.

Lorsqu'une itération du balayage ne permet pas de déterminer un meilleur pont possible, le procédé 200 passe à l'étape 250. Les points restants de l'ensemble E sont alors supportés par des piliers 14 prolongés jusque sur le plan de base XY, ou, le cas échéant, jusque sur la portion de la surface de l'objet située au-dessous, sur laquelle ils prennent appui. Le fichier F10 de description de la structure est mis à jour.

Eventuellement, peut être implémentée une contrainte sur la hauteur maximum d'un pilier 14. En cas de dépassement de cette hauteur, le pilier est réduit et est supporté par un pont supplémentaire.

Puis, le fichier de description de la structure de support et celui de l'objet sont fusionnés pour permettre la génération d'un fichier de commandes permettant l'impression de l'objet et de la structure de support par une imprimante 3D à filament.

Il est à noter que la fonction de gain peut être modifiée pour décourager la formation de ponts dont les extrémités sont au-dessus de la surface de l'objet à fabriquer.

Les fonctions de gain et de score permettent une grande flexibilité et un contrôle de la structure. De plus, des évènements artificiels peuvent être ajoutés à la liste Q pour guider la forme de la structure.

REVENDICATIONS

- 1.- Structure de support (10) pour supporter un objet (2) au cours de sa fabrication en mettant en œuvre un procédé de fabrication additive, la structure de support et l'objet étant fabriqués simultanément, caractérisée en ce qu'elle est composée d'une pluralité de ponts (12) horizontaux et rectilignes, de piliers (14) verticaux et de connecteurs (16) inclinés, une extrémité inférieure d'un pilier reposant sur un pont, sur un plan de base ou sur un point d'une surface de l'objet, et une extrémité supérieure d'un pilier portant un connecteur, et une extrémité inférieure d'un connecteur reposant à l'extrémité supérieure d'un pilier et l'extrémité supérieure d'un connecteur correspondant à un point à la surface de l'objet ou à un point à supporter d'un pont, chaque pont étant supporté au moins à chacun de ses deux points d'extrémité, soit par un connecteur soit par un point de l'objet, et les piliers et connecteurs pouvant présenter une hauteur nulle.
- 2.- Structure de support (10) selon la revendication 1, dans laquelle un pont supporte, via des piliers et/ou des connecteurs, une pluralité de $\underline{n}$ points à supporter, et étant supporté par $\underline{p}$ points de support, $\underline{n}$ étant strictement supérieur à $\underline{p}$.
- 3.- Structure de support (10) selon la revendication 2, dans laquelle un connecteur (16) fait un angle (a_0) inférieur à un angle maximal ($a_{0\max}$) prédéterminé et possède une hauteur (h_0) inférieure à une hauteur maximale ($h_{0\max}$) prédéterminée.
- 4.- Structure de support (10) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle chaque pont (12) suit, dans un plan horizontal, une direction choisie dans un ensemble de directions possibles.
- 5.- Structure de support (10) selon la revendication 4, dans laquelle l'ensemble des directions possibles comporte $\underline{d}$ directions, faisant de préférence un angle de π/d entre elles.
- 6.- Structure de support (10) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle, un procédé de fabrication additive du type impression 3D à filament étant mis en œuvre, un pont (12) est constitué par au moins un filament imprimé entre deux points de support, lesdits deux points de support correspondant chacun à l'extrémité supérieure d'un connecteur (16) ou un point à la surface de l'objet (2).

7.- Structure de support (10) selon la revendication 6, dans laquelle une distance entre les points de support d'un pont (14) est inférieure à une portée maximale ($D_{\max}$).

8.- Structure de support (10) selon la revendication 6 ou la revendication 7, dans laquelle un pont (12) est constitué de deux couches, chaque couche étant constituée de deux filaments disposés côte à côte.

9.- Structure de support (10) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle chaque pilier et/ou chaque connecteur présente une section transversale en forme de croix.

10.- Structure de support (10) selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle un point à la surface de l'objet correspondant à l'extrémité supérieure d'un connecteur ou à l'extrémité d'un pont est un point à supporter de l'objet.

11.- Procédé de génération automatique d'une structure de support (10) pour un objet (2) à fabriquer en mettant en œuvre un procédé de fabrication additive, notamment un procédé d'impression 3D à filament, l'objet et le support étant fabriqués simultanément, caractérisé en ce que, la structure étant conforme à l'une quelconque des revendications 1 à 10, le procédé comporte les étapes consistant à :

- initialiser un ensemble (E) de points à supporter à partir de points à la surface de l'objet ;

puis, pour chaque direction d'un ensemble de directions de balayage horizontale,

- déplacer un plan de balayage orthogonalement à la direction de balayage courante ; et, lorsque le plan de balayage coïncide avec un point à supporter, créer un pont possible dans le plan de balayage supportant les points à supporter dudit ensemble des points à supporter qui vérifient un critère de distance au plan de balayage ;
- pour chaque pont possible créé lors du balayage selon la direction de balayage courante, calculer une valeur d'une fonction de coût pour la fabrication dudit pont possible ;
- sélectionner un meilleur pont possible (BPP) parmi les ponts possibles sur la base de la valeur calculée de la fonction de coût ;
- soustraire de l'ensemble des points à supporter, les points supportés par le meilleur pont possible et ajouter au moins les deux extrémités du meilleur pont possible à l'ensemble des points à supporter ;

- placer dans un fichier de description de la structure de support des informations géométriques relatives aux composants de la structure de support associés aux points supportés par le meilleur pont possible.

12.- Procédé selon la revendication 11, comportant en outre une étape consistant à définir un ensemble (S) de segments, à associer au moins un segment à chaque point à supporter de l'ensemble (E) des points à supporter, un point à supporter faisant partie des points supportés par un pont possible lorsque le plan de balayage coupe ledit au moins un segment associé.

13.- Procédé selon la revendication 12, dans lequel l'étape consistant à définir un ensemble (S) de segments à partir des points de l'ensemble (E) des points à supporter, consiste à définir :

- pour chaque point de l'ensemble (E) des points à supporter, un segment (Seg1) d'un premier type, qui est parallèle à la direction de balayage, centré sur le point considéré, et possède une première longueur prédéfinie ; et/ ou
- pour chaque point de l'ensemble (E) des points à supporter qui correspondent à un point d'extrémité d'un pont, un segment (Seg2) d'un second type, qui est parallèle audit pont, s'étend au-delà du point d'extrémité correspondant, sur une seconde longueur, qui dépend d'une portée maximale (D_{max}) pour les ponts qu'il est possible de fabriquer.

14.- Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 13, dans lequel l'étape consistant à calculer une fonction de coût consiste à calculer une fonction de gain (G) permettant de ne retenir que les ponts possibles qui permettent de soutenir au moins $\underline{n}$ points de l'ensemble (E) des points à supporter, $\underline{n}$ étant un entier supérieur au nombre $\underline{p}$ de points supportant le pont possible considéré.

15.- Procédé selon la revendication 14, dans lequel la fonction de gain G prend la forme : $G = (n-2) \times h - l$, où $\underline{h}$ est une hauteur maximale du pont possible et $\underline{l}$ une longueur minimale du pont possible.

16.- Procédé selon la revendication 14 ou la revendication 15, dans lequel l'étape consistant à calculer une fonction de coût consiste à calculer une fonction de score permettant de sélectionner, parmi les ponts possibles ayant un gain positif, le meilleur pont possible (BPP) comme le pont possible ayant la plus grande valeur de la fonction de score.

17.- Procédé selon la revendication 16, dans lequel la fonction de score F prend la forme: $F = G - n \times l_{\max}$, où G est le gain calculé et $l_{\max}$ est la plus grande des hauteurs parmi les hauteurs des n piliers verticaux connectant le pont possible à un point à supporter .

5

18.- Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 17, dans lequel les étapes sont itérées sur une pluralité de directions horizontales différentes, faisant de préférence un angle de π/d entre elles.

10

19.- Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 18, comportant une étape de vérification qu'un pont possible ne rentre pas en collision avec l'objet à fabriquer.

20.- Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 à 19, comportant une étape de vérification qu'un pont possible ne dépasse pas une portée maximale pour les ponts qu'il est possible de fabriquer compte tenu du procédé de fabrication mis en œuvre.

15

1/7

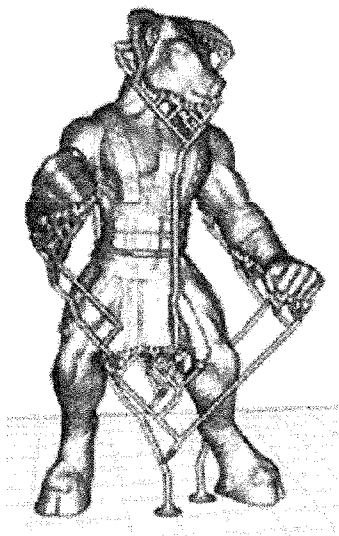


FIG.1
ART ANTERIEUR

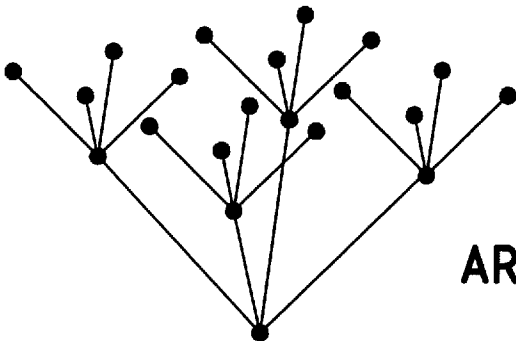


FIG.2
ART ANTERIEUR

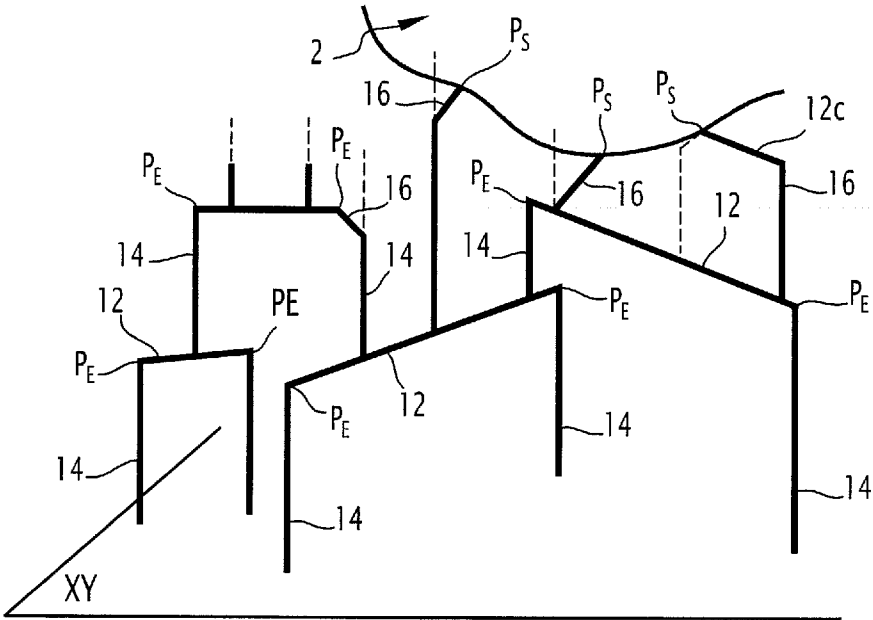
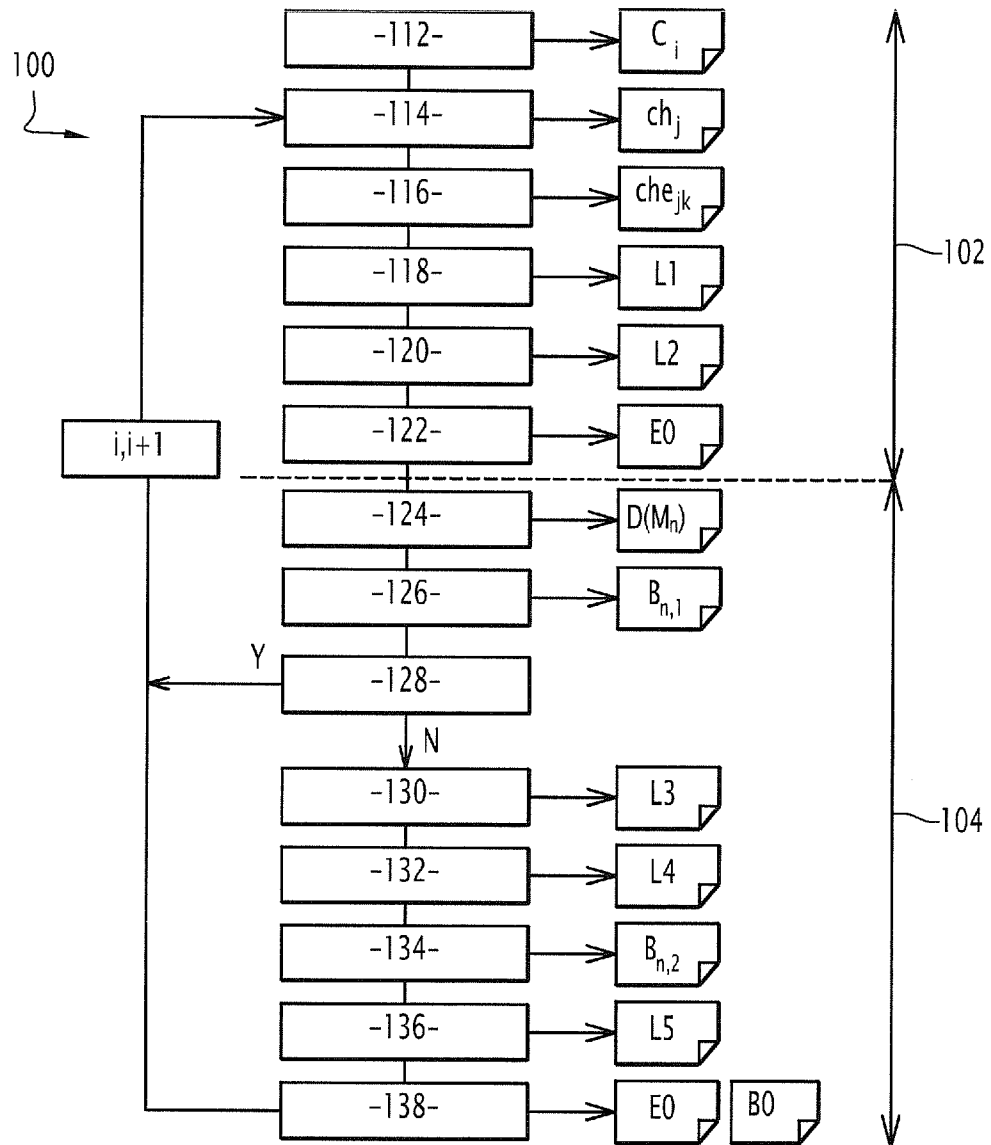


FIG.3

2/7

FIG.4

3/7

FIG.5a

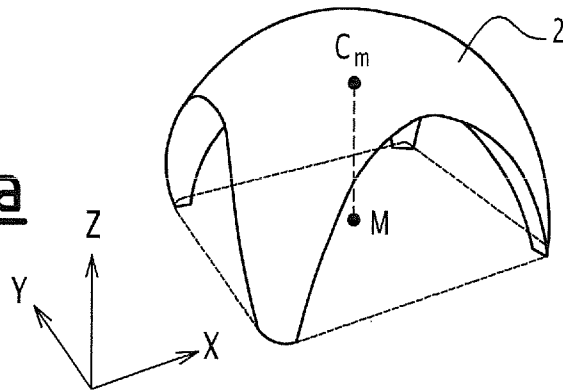


FIG.5b

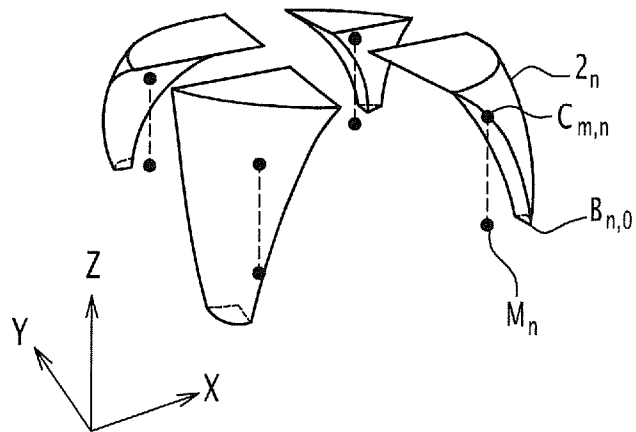
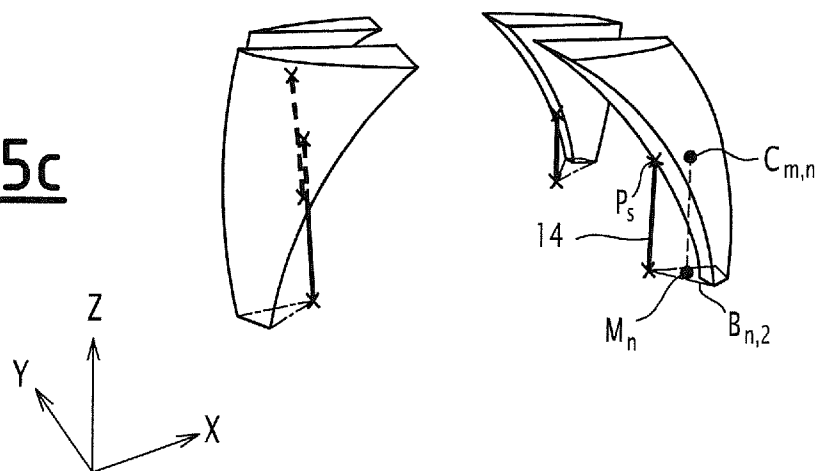


FIG.5c



4/7

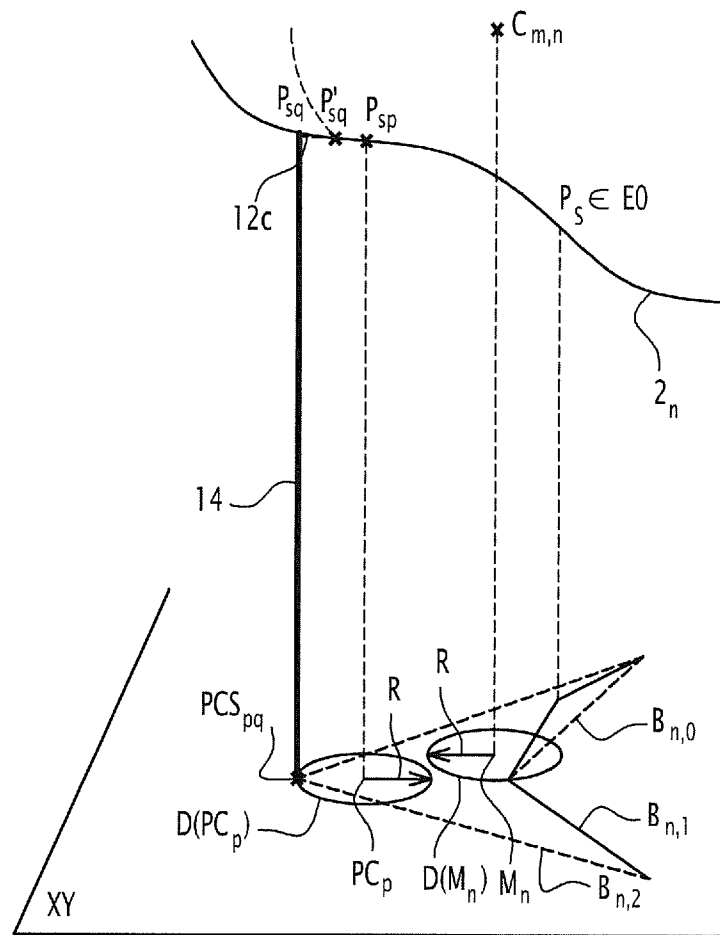
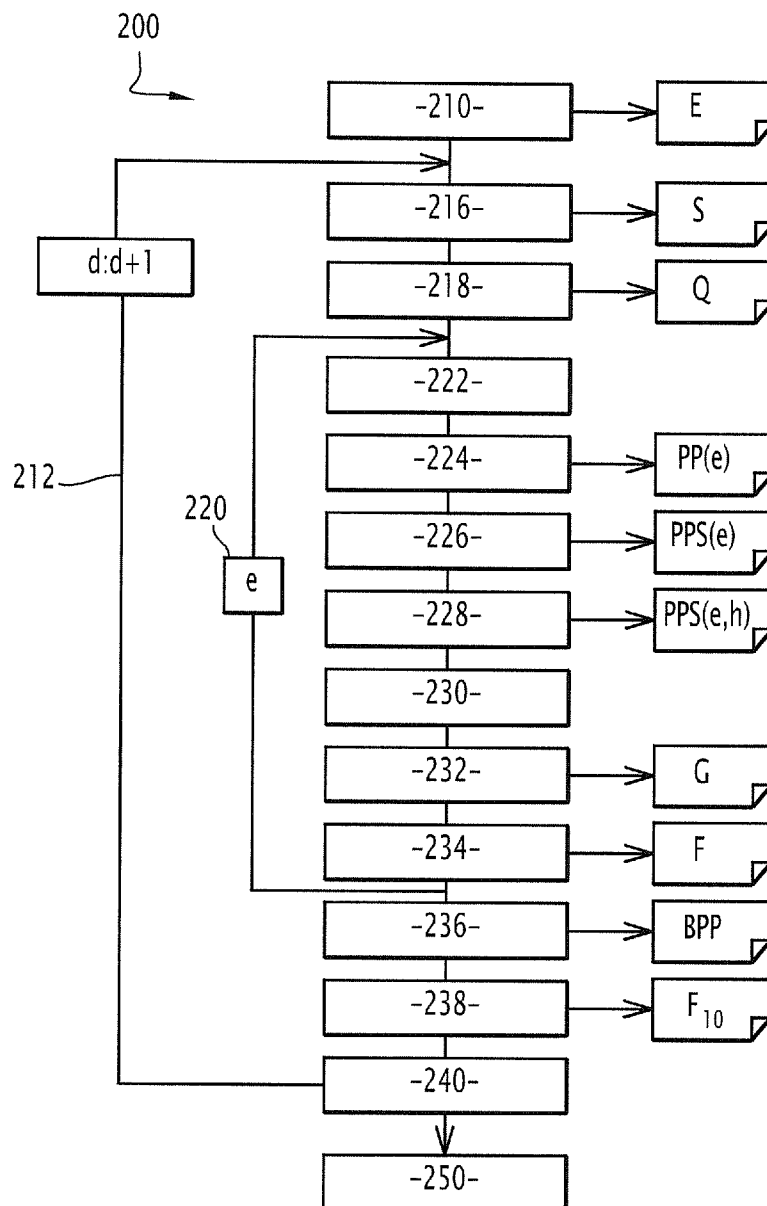


FIG.6

5/7

FIG. 7

6/7

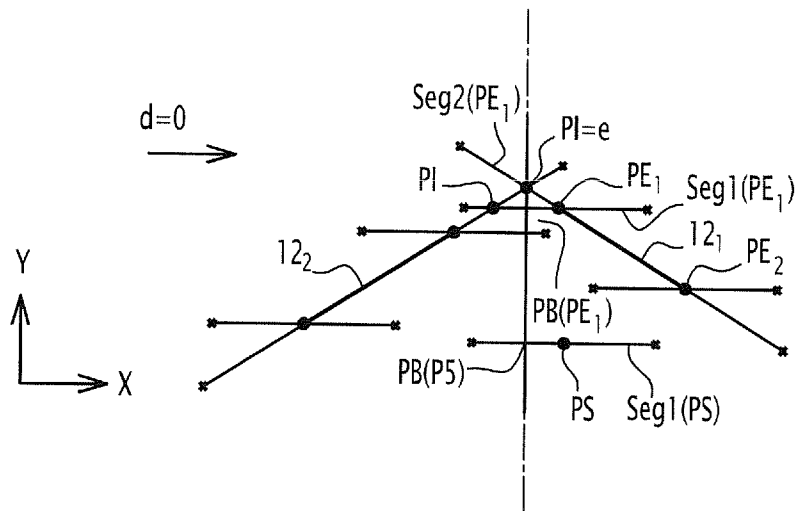


FIG.8

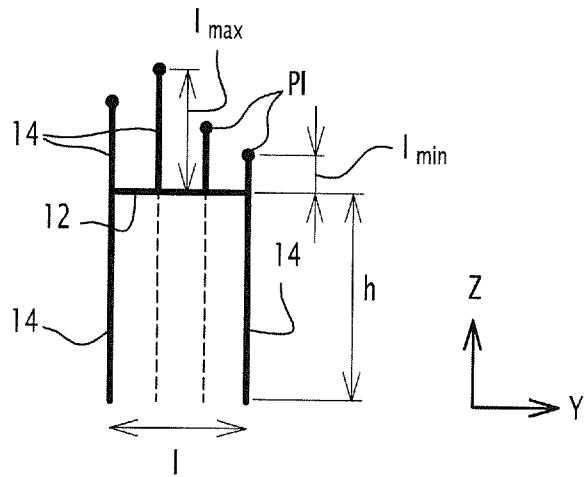


FIG.9

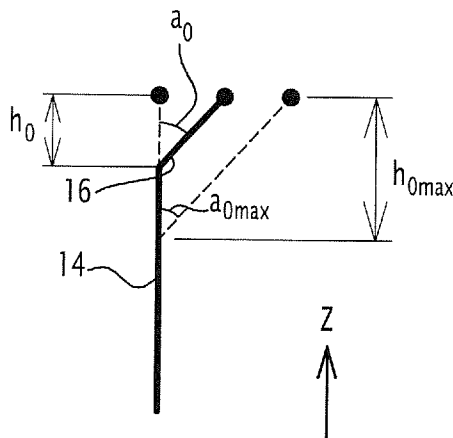


FIG.10

7/7

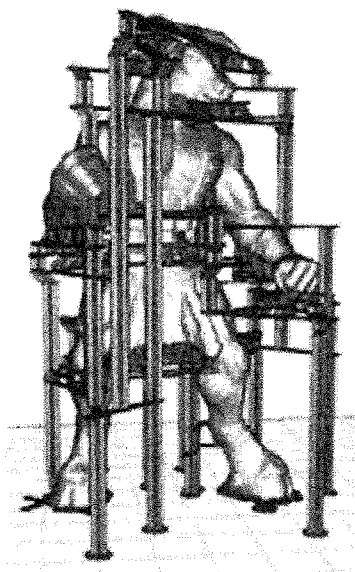


FIG.11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2015/051446

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 INV. B29C67/00
 ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 B29C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 595 703 A (SWAELENS BART [BE] ET AL) 21 January 1997 (1997-01-21) figure 9 column 3, line 6 - line 20 column 5, line 22 - column 6, line 35 -----	1-10
X	WO 2009/047355 A1 (MATERIALISE NV [BE]; EGGERS GERALD [BE]; RENAP KURT [BE]) 16 April 2009 (2009-04-16)	1-10
A	page 3, line 7 - page 6, line 12 page 8, line 19 - page 12, line 12 page 13, line 32 - page 16, line 4 -----	11-20
A	US 5 216 616 A (MASTERS WILLIAM E [US]) 1 June 1993 (1993-06-01) figures 7,8,10 column 6, line 36 - column 7, line 9 ----- -/--	1-20



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

11 September 2015

Date of mailing of the international search report

21/09/2015

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Whelan, Natalie

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/FR2015/051446

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 0 666 163 A2 (STRATASYS INC [US] STRATASYS INC) 9 August 1995 (1995-08-09) figures 3b,5 page 2, line 34 - line 42 page 5, line 5 - line 39 page 10, line 40 - line 50 -----	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2015/051446

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5595703	A	21-01-1997	BE 1008128 A3 23-01-1996 DE 19507881 A1 14-09-1995 US 5595703 A 21-01-1997
WO 2009047355	A1	16-04-2009	AT 500576 T 15-03-2011 EP 2198405 A1 23-06-2010 JP 5383687 B2 08-01-2014 JP 2011501251 A 06-01-2011 US 2010228369 A1 09-09-2010 US 2015151494 A1 04-06-2015 WO 2009047355 A1 16-04-2009
US 5216616	A	01-06-1993	NONE
EP 0666163	A2	09-08-1995	EP 0666163 A2 09-08-1995 JP H07227898 A 29-08-1995

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2015/051446

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. B29C67/00
ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
B29C

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 5 595 703 A (SWAELENS BART [BE] ET AL) 21 janvier 1997 (1997-01-21) figure 9 colonne 3, ligne 6 - ligne 20 colonne 5, ligne 22 - colonne 6, ligne 35 -----	1-10
X	WO 2009/047355 A1 (MATERIALISE NV [BE]; EGGERS GERALD [BE]; RENAP KURT [BE]) 16 avril 2009 (2009-04-16)	1-10
A	page 3, ligne 7 - page 6, ligne 12 page 8, ligne 19 - page 12, ligne 12 page 13, ligne 32 - page 16, ligne 4 -----	11-20
A	US 5 216 616 A (MASTERS WILLIAM E [US]) 1 juin 1993 (1993-06-01) figures 7,8,10 colonne 6, ligne 36 - colonne 7, ligne 9 ----- -/-	1-20



Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents



Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

11 septembre 2015

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

21/09/2015

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Whelan, Natalie

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	EP 0 666 163 A2 (STRATASYS INC [US] STRATASYS INC) 9 août 1995 (1995-08-09) figures 3b,5 page 2, ligne 34 - ligne 42 page 5, ligne 5 - ligne 39 page 10, ligne 40 - ligne 50 -----	1-20

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2015/051446

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5595703	A	21-01-1997	BE 1008128 A3 DE 19507881 A1 US 5595703 A	23-01-1996 14-09-1995 21-01-1997
WO 2009047355	A1	16-04-2009	AT 500576 T EP 2198405 A1 JP 5383687 B2 JP 2011501251 A US 2010228369 A1 US 2015151494 A1 WO 2009047355 A1	15-03-2011 23-06-2010 08-01-2014 06-01-2011 09-09-2010 04-06-2015 16-04-2009
US 5216616	A	01-06-1993	AUCUN	
EP 0666163	A2	09-08-1995	EP 0666163 A2 JP H07227898 A	09-08-1995 29-08-1995