

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

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

**3 119 562**

②1 N° d'enregistrement national : **21 01233**

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : **B 29 C 64/124** (2020.12), B 29 C 64/386, B 29 C 64/  
268, B 33 Y 30/00, B 33 Y 10/00

⑫

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤4 Procédé d'impression d'un objet à imprimer, et imprimante adaptée pour la mise en oeuvre du procédé.

②2 Date de dépôt : 09.02.21.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 12.08.22 Bulletin 22/32.

④5 Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 30.08.24 Bulletin 24/35.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : UNIVERSITE CLAUDE BERNARD  
LYON 1 Etablissement public national à caractère  
scientifique culturel et professionnel —FR, CENTRE  
NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Etablissement public national à caractère administratif  
FR, ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE LYON  
Etablissement public national à caractère scientifique  
culturel et professionnel FR et INSTITUT MINES  
TELECOM Etablissement public national à caractère  
scientifique culturel et professionnel — FR.

⑦2 Inventeur(s) : BALDECK Patrice, TELLAL Azeddine  
et HEGGARTY Kevin.

⑦3 Titulaire(s) : UNIVERSITE CLAUDE BERNARD  
LYON 1 (EPSCP), CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (EPA), ECOLE  
NORMALE SUPERIEURE DE LYON (EPSCP),  
INSTITUT MINES TELECOM (EPSCP).

⑦4 Mandataire(s) : INNOV-GROUP.

**FR 3 119 562 - B1**



## Description

### **Titre de l'invention : Procédé d'impression d'un objet à imprimer, et imprimante adaptée pour la mise en oeuvre du procédé.**

#### **Domaine technique**

- [0001] La présente demande concerne un procédé de projection optique adapté pour l'impression en trois dimensions (3D), ainsi qu'une imprimante 3D, utilisant une réaction photochimique non linéaire induite par absorption d'une énergie fournie par un faisceau lumineux pour modifier une composition photoréactive.
- [0002] Etat de l'art
- [0003] La composition à modifier peut être de divers types. Cette composition peut comprendre une résine se solidifiant par polymérisation ou photo-réticulation, une résine dont les propriétés de solubilité se modifient par photochimie, des protéines se solidifiant par photo-réticulation, ou encore des sels métalliques se solidifiant par photo-réduction. L'excédent de composition non modifiée est dissous par un solvant approprié après la modification. La modification de la composition est très localisée parce que les rendements de ces réactions photochimiques résultent d'une chimie non linéaire en irradiation ou en fluence. Par exemple, les rendements de ces réactions photochimiques induites par absorption à deux photons sont proportionnels au carré de l'intensité de la source laser utilisée de sorte que la modification de la composition est très localisée. Dans d'autres exemples la non linéarité est obtenue par un mécanisme d'addition successives de photons, ou par un mécanisme de polymérisation à seuil, ou par un mécanisme non linéaire de chimie.
- [0004] Le brevet D1 = FR3023012 décrit une imprimante 3D dans laquelle un faisceau laser de longueur d'onde et de puissance appropriées est focalisé successivement en des points d'une composition réactive de sorte que les volumes du matériau situés aux points de focalisation successifs du faisceau se modifient par une réaction photochimique induite par absorption à deux photons.
- [0005] Dans D1, l'imprimante 3D comprend une source laser, un objectif de focalisation et un bac de composition à modifier reposant sur une table, la dite table pouvant être déplacée selon des directions orthogonales (directions X, Y) ou parallèle (direction axiale Z) à la direction de propagation d'un faisceau laser produit par la source.
- [0006] En fonctionnement, le faisceau laser est focalisé par l'objectif en un point focal situé dans la composition à modifier, la puissance du faisceau diminuant en s'éloignant du point focal.
- [0007] Autour du point focal, là où la puissance du faisceau lumineux est suffisante, la composition se solidifie localement pour former un voxel de cette composition. On appelle

volume focal un volume de composition centré sur un point focal, volume dans lequel l'énergie du faisceau lumineux est suffisante pour déclencher la modification de la composition.

- [0008] Dans D1, la table XYZ est commandée de sorte que le volume focal associé au point focal du faisceau est déplacé dans le matériau pour former des voxels les uns après les autres jusqu'à ce que le volume de l'objet 3D à imprimer ait été solidifié. L'objet est ainsi imprimé voxel par voxel, d'abord dans un plan orthogonal au faisceau et défini par les directions X, Y puis plan par plan selon la direction Z.
- [0009] Comme exprimé dans l'art antérieur de D1, l'utilisation d'une telle imprimante 3D permet d'imprimer des voxels de dimensions inférieures au micromètre, voire à la centaine de nanomètres avec une très grande résolution, de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. Une telle imprimante est ainsi appropriée pour réaliser des objets de très petite taille, comprenant un petit nombre de voxels.
- [0010] Mais pour la réalisation d'objets ayant des dimensions au moins 1000 fois supérieures aux dimensions d'un voxel, c'est à dire de l'ordre du millimètre ou plus, le temps d'impression devient très long lorsqu'une très grande résolution est recherchée.
- [0011] Pour raccourcir le temps d'impression, D1 propose une solution pour ajuster la dimension des voxels en cours d'impression, permettant ainsi d'imprimer successivement des voxels de très petite taille et des voxels de plus grande taille. Cette solution technique permet effectivement d'accélérer le temps d'impression d'un objet, mais au détriment de la résolution, notamment la résolution axiale (selon l'axe Z), dans les zones où les voxels sont de plus grande taille. Ceci s'explique parce qu'une augmentation des dimensions latérales (selon les axes X et Y) des voxels entraîne mécaniquement une diminution de la résolution latérale mais aussi axiale comme montré dans le document D2 = « Hernandez-Cubero, O. "Advanced Optical methods for fast and three-dimensional control of neural activity." Paris Descartes University, France (2016) ».
- [0012] Le document D3 = "Microstereophotolithography using a liquid crystal display as dynamic mask-generator", A. Bertsch, S. Zissi, J.Y. Jézéquel, S. Corbel, J.C.André, *Microsystem Technologies* (1997)42-47, Springer Verlag 1997, propose un procédé d'impression 3D plus rapide par la photopolymérisation d'images 2D à la surface de la résine. La résolution axiale est obtenue par fabrication stéréolithographie (couche par couche) et l'ajout d'un absorbant pour limiter la propagation de la lumière hors de la couche. La mise en oeuvre de ce procédé est de plus limitée à l'utilisation de résines liquides pour pouvoir déplacer l'objet en fabrication dans la résine au changement de couche.
- [0013] Le document D4 = « Saha, Sourabh K., et al. "Scalable submicrometer additive manufacturing." *Science* 366.6461 (2019): 105-109. » décrit l'utilisation d'une technique

de compression spatio-temporelle pour obtenir une résolution axiale lors de la projection d'une image 2D dans le volume d'une composition photopolymérisable. Ce procédé nécessite l'utilisation de sources laser à impulsions femtosecondes et ne peut être généralisé aux autres sources lumineuses de photopolymérisation.

- [0014] Le document D5= « Regehly, Martin, et al. "Xolography for linear volumetric 3D printing." *Nature* 588.7839 (2020): 620-624. » décrit l'utilisation d'une technique de photopolymérisation 3D basée sur l'intersection de deux faisceaux lumineux de couleurs différentes. Le premier faisceau projette, sans résolution axiale, les images à polymériser dans le bac de résine. La propagation se fait sans réaction photochimique jusqu'au point d'intersection avec le deuxième faisceau, une feuille de lumière perpendiculaire, qui rend les molécules photo-initiatrices sensibles à la couleur du premier faisceau, et donc permet d'obtenir la résolution axiale. Ce procédé est limité à l'utilisation de molécules photo-initiateurs très spécifiques et aux résines à polymérisation radicalaire. Il ne peut pas être généralisé aux systèmes photo-chimiques utilisés dans l'état de l'art.
- [0015] Le document D6 = "One-Step volumetric additive manufacturing of complex polymer structures" Shusteff, Maxim, Allison EM Browar, Brett E. Kelly, Johannes Henriksson, Todd H. Weisgraber, Robert M. Panas, Nicholas X. Fang, and Christopher M. Spadaccini. "One-step volumetric additive manufacturing of complex polymer structures." *Science advances* 3, no. 12 (2017): eaao5496, décrit une nouvelle technologie consistant à projeter une image 3D volumique dans le bac de composition photoréactive non linéaire, ce qui permet d'accélérer considérablement le temps d'impression. De plus, la projection, et donc la réaction chimique, se fait à l'intérieur même du bac de composition et non en surface, de sorte qu'il n'est plus nécessaire de déplacer la table supportant le bac de composition ni d'utiliser un porte-échantillon mobile dans le bac de composition. Egalement, il devient possible d'utiliser des compositions photoréactives visqueuses dans la mesure où la projection est effectuée à l'intérieur du volume de composition et où il n'est plus nécessaire de déplacer un porte-échantillon dans le bac de composition. Pour cette nouvelle technologie, la fabrication d'objets millimétriques nécessite l'addition orthogonale de trois images 2D pour obtenir la résolution axiale par polymérisation non linéaire uniquement aux lieux d'addition des irradiations projetées. Ce qui rend le montage optique complexe et limite les formes géométriques 3D pouvant être imprimées.
- [0016] Le développement récent de résines non linéaires, telles que celles décrites dans le document D7 = WO2019025717, optimisées à la photopolymérisation très localisée comme STTA-UC permet d'envisager le développement de nouvelles imprimantes 3D ultrarapides utilisant la projection directe d'images 2D ou 3D dans le volume de la résine.

- [0017] Mais il est reste nécessaire de résoudre le problème de la perte de résolution axiale liée à la dimension latérale des zones lumineuses à polymériser.
- [0018] Description de l'invention
- [0019] La présente invention vise à pallier au moins un des inconvénients des procédés d'impression et des imprimantes connus rappelés ci-dessus.
- [0020] A cet effet, l'invention propose un procédé d'impression d'un objet dans un volume de composition photoréactive à partir d'une image de l'objet à imprimer, image définie par une matrice de pixels comprenant une pluralité de pixels éclairés adjacents définissant l'objet à imprimer,  
procédé d'impression caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes, consistant à :
- décomposer (ET2) l'image en une séquence de mosaïques, chaque mosaïque étant définie par une matrice de pixels comprenant une pluralité de groupes de pixels éclairés adjacents autrement nommés aplats, une superposition de toutes les mosaïques de la séquence permettant de reconstituer l'image de l'objet à imprimer, et
  - projeter (ET3), selon une direction axiale, successivement chacune des mosaïques de la séquence de mosaïques dans le volume de composition photoréactive.
- [0021] Lors de la projection d'aplat (ou groupes de pixels) comprenant un grand nombre de pixels adjacents, se traduisant par l'éclairage simultané d'un grand nombre de volumes focaux adjacents, comme c'est le cas lors de la projection d'une image d'un objet massif, on constate que la lumière diffractée par l'ensemble de ces volumes focaux adjacents est suffisante pour générer des réactions chimiques non linéaires non souhaitées sur des distances plus longues que celle des volumes focaux isolés, ce qui se traduit par une détérioration importante de la résolution axiale (selon l'axe Z) de l'objet imprimé. La décomposition selon l'invention de l'image initiale en des mosaïques comprenant uniquement des aplats de pixels éclairés de petite taille, c'est-à-dire des aplats comprenant un nombre de pixels plus petit que les aplats présents dans l'image initiale d'un objet à imprimer ou même comprenant un unique pixel, permet de conserver une bonne résolution axiale. Plutôt que d'imprimer un objet massif en une seule étape aboutissant à une résolution faible, l'invention propose ainsi d'imprimer le même objet par des impressions successives d'aplat comprenant chacun un plus petit nombre de pixels éclairés pour conserver une résolution optimale. Dans ce cas, les petits aplats ont des irradiations suffisantes pour polymériser uniquement autour de leurs points focaux, et leurs intensités diffractées sont trop faibles pour déclencher une réaction de polymérisation parasite dégradant la résolution axiale.
- [0022] De préférence, dans les mosaïques, la plus grande dimension d'un aplat de pixels éclairés est inférieure à une dimension maximale fonction d'une résolution axiale souhaitée pour l'objet à imprimer. La dimension maximale dépend notamment de la ré-

solution axiale des moyens de projection utilisés pour réaliser l'étape ET3 et des propriétés intrinsèques de la composition photoréactive. La dimension maximale de la plus grande dimension d'un aplat en fonction de la résolution axiale souhaitée pour l'objet à imprimer doit être caractérisée par des essais avec les moyens de projection et la composition photoréactive choisis.

- [0023] De préférence également, la plus petite distance entre deux aplats voisins est supérieure à une distance minimale fonction de la résolution axiale souhaitée pour l'objet à imprimer. L'expérience montre qu'il est préférable d'avoir une distance minimale de l'ordre de 2 à 3 fois la dimension maximale pour ne pas dégrader la résolution axiale.
- [0024] Selon un mode de mise en oeuvre du procédé, l'image de l'objet à imprimer est une distribution lumineuse en 3 dimensions (appelée image 3D), et les mosaïques et les aplats dans les dites mosaïques sont également en 3D. Selon un autre mode de mise en oeuvre du procédé, également adapté à l'impression d'un objet 3D à partir d'une image 3D représentant le dit objet à imprimer, le procédé peut également comprendre les étapes suivantes :
- une étape initiale (ET1) de découpage d'une image 3D en une série d'images 2D représentatives de l'objet à imprimer dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à une direction axiale de projection d'image dans le volume de composition,
  - les étapes ET2-ET3 de décomposition et de projection sont répétées pour chacune des images 2D de la série, la projection, au cours d'une étape ET3, étant réalisée selon la direction axiale dans un plan focal situé dans le volume de composition photoréactive et perpendiculaire à la direction axiale, et :
  - une étape (ET4) de déplacement du plan focal dans le volume de composition est réalisée entre chaque réalisation des étapes ET2-ET3 de décomposition et de projection d'une image 2D.
- [0025] Le déplacement du plan focal dans la composition évite de déplacer l'objet en cours d'impression dans le volume de composition. Il devient ainsi possible d'utiliser des compositions visqueuses, voire solides. Egalement, il n'est plus nécessaire d'utiliser des renforts pour maintenir, pendant son déplacement dans la composition, un objet fragile en cours d'impression.
- [0026] L'invention propose également une imprimante adaptée pour la mise en oeuvre d'un procédé d'impression décrit ci-dessus, imprimante comprenant notamment :
- un bac (2) contenant un volume de composition photoréactive, et
  - un projecteur (10) d'image agencé pour projeter une image dans le volume de composition,
- l'imprimante comprenant également des moyens agencés pour mettre en oeuvre le procédé d'impression décrit ci-dessus, les dits moyens comprenant un générateur (15) de séquences de mosaïques agencé pour décomposer l'image de l'objet à imprimer en

une séquence de mosaïques et fournir successivement chacune des mosaïques de la séquence au projecteur pour la réalisation de l'étape ET3 de projection.

[0027] Le projecteur d'image est choisi avec des résolutions latérales et axiales adaptées aux résolutions latérales et axiales souhaitées pour l'objet à imprimer.

### **Brève description des figures**

[0028] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée d'exemples de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemple uniquement, et en référence aux dessins annexés dans lesquels :

[Fig.1] présente schématiquement une imprimante selon l'invention,

[Fig.2] présente schématiquement une étape essentielle d'un procédé d'impression selon l'invention.

[0029] Par convention, on utilisera l'adjectif adjacent pour parler de deux objets qui sont côte-à-côte et qui se touchent, par exemple des pixels adjacents se touchent par un côté. On utilisera l'adjectif voisin pour parler de deux objets situés à proximité l'un de l'autre mais qui ne se touchent pas, par exemple deux pixels éclairés sont voisins s'ils sont séparés l'un de l'autre par au moins un pixel non éclairé.

[0030] Par convention également, on définit une direction axiale Z comme étant une direction de projection d'une image par un projecteur dans un volume de composition, et on définit deux directions latérales, X, Y, perpendiculaires entre elles et perpendiculaires à la direction axiale Z (cf le repère [Fig.1]).

[0031] On définit également les termes suivants. Une image d'un objet est définie par une matrice de pixels comprenant des pixels éclairés et des pixels éteints, les pixels éclairés définissant l'objet à imprimer. Un aplats est un groupe de pixels éclairés adjacents à au moins un autre pixel du même groupe. Une mosaïque est définie par une matrice comprenant une pluralité d'aplat, une superposition de toutes les mosaïques d'une séquence de mosaïques permettant de reconstituer l'image de l'objet à imprimer.

[0032] Description détaillée de modes de réalisation de l'invention

[0033] Comme dit précédemment, l'invention concerne l'impression d'objets 3D par projection d'images dans un volume de composition photoréactive non linéaire, dont la modification de la composition est localisée dans les lieux d'irradiation intense.

[0034] De manière connue, un objet en deux (ou trois) dimensions peut être représenté sous forme d'une image 2D (ou 3D), c'est-à-dire s'étendant dans deux directions X, Y (ou trois directions X, Y et Z), image définie par une matrice de pixels à deux (ou trois) dimensions comprenant une pluralité de pixels éclairés correspondant à des points de l'objet 2D (ou 3D).

[0035] Le procédé d'impression selon l'invention comprend les étapes suivantes, consistant à :

- décomposer (ET2) l'image en une séquence de mosaïques, chaque mosaïque étant définie par une matrice de pixels comprenant une pluralité de groupes de pixels éclairés adjacents autrement nommés aplats, une superposition de toutes les mosaïques de la séquence permettant de reconstituer l'image de l'objet à imprimer, et  
 - projeter (ET3), selon une direction axiale, successivement chacune des mosaïques de la séquence de mosaïques dans le volume de composition photoréactive.

[0036] Comme dit précédemment, un aplat est un groupe de pixels éclairés formant une tâche lumineuse lorsqu'ils sont projetés dans la composition. Un aplat peut être à deux dimensions (X, Y) ou trois dimensions (X, Y, Z), selon que la mosaïque est à deux ou trois dimensions.

[0037] La [Fig.2] montre à titre d'exemple simple la décomposition d'une image 2D initiale en quatre mosaïques 2D de dimensions 24\*24 pixels. Dans cet exemple simple, les aplats les plus grands de l'image 2D initiale comprennent 2\*10 pixels éclairés, et la décomposition est telle que les aplats dans les mosaïques comprennent au maximum 2\*2 pixels éclairés. La décomposition selon l'invention d'images en séquences de mosaïques peut tout aussi bien s'appliquer de manière similaire à la décomposition d'une image 3D représentant un objet 3D et définie par une matrice à trois dimensions.

[0038] Egalement, dans l'exemple simplifié de la [Fig.2], où les aplats dans l'image initiale comprennent au plus 20 pixels éclairés adjacents, une décomposition en quatre mosaïques seulement permet d'obtenir des mosaïques comprenant des aplats comprenant au maximum 4 pixels éclairés. Bien sûr, pour des objets à imprimer de plus grande taille, par exemple de l'ordre de 1 à 10 millimètres, représentés par des images de plus grande taille, par exemple des images définies par une matrice de 10000\*10000 pixels (en 2D) ou par une matrice de 10000\*10000\*10000 pixels (en 3D), avec des pixels de l'ordre du micromètre, le nombre de mosaïques dans une décomposition peut devenir rapidement important, même si des aplats comprenant plus de 1 pixel éclairé sont acceptables. Le nombre de mosaïques dépendra ainsi en pratique de la densité de l'objet à imprimer ou dit, autrement, du nombre de pixels éclairés et de la dimension des aplats initiaux dans l'image initiale représentant l'objet à imprimer, et de la résolution souhaitée pour l'objet imprimé.

[0039] Pour avoir une bonne résolution, notamment une bonne résolution axiale, la plus grande dimension d'un aplat de pixels éclairés dans une mosaïque est choisie inférieure à une dimension maximale fonction d'une résolution axiale souhaitée pour l'objet à imprimer. La notion de "plus grande dimension" doit être comprise au sens le plus large : il peut s'agir d'une dimension latérale (dans un plan parallèle aux directions X, Y), ou d'une dimension axiale (la direction axiale Z), ou plus largement d'une dimension dans une direction quelconque.

[0040] La dimension maximale de la plus grande dimension d'un aplat d'une mosaïque en

fonction de la résolution axiale souhaitée pour l'objet à imprimer doit être caractérisée par des essais avec les moyens de projection et la composition photoréactive choisis. Par exemple, des essais réalisés dans les conditions matérielles (moyens de projection et choix de composition) de l'expérience décrite dans le document D2, montrent que la résolution axiale d'un spot (élément de composition modifié) obtenu par projection holographique est égale à 1,6 fois le diamètre de l'aplat projeté. Dit autrement, pour obtenir, pour l'objet à imprimer, une résolution axiale égale à 16  $\mu\text{m}$ , 8  $\mu\text{m}$  ou 1,6  $\mu\text{m}$ , la dimension maximale d'un aplat est choisie égale à 10  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  ou 1  $\mu\text{m}$ .

- [0041] Egalement, la plus petite distance entre deux aplats voisins est supérieure à une distance minimale fonction de la résolution axiale souhaitée. La notion de "plus petite distance" doit être comprise au sens le plus large : il peut s'agir d'une distance latérale (dans un plan parallèle aux directions X, Y), d'une distance axiale (selon la direction axiale Z), ou plus largement d'une distance dans une direction quelconque. Lors de la projection d'un aplat de pixels éclairés, la lumière projetée localement est suffisante pour déclencher la transformation de la composition, mais insuffisante pour que sa lumière diffractée déclenche une réaction parasite qui dégrade sa résolution axiale. Toutefois, si deux aplats sont trop proches l'un de l'autre, l'addition de leurs lumières diffractées peut devenir suffisante pour déclencher une transformation non souhaitée de la composition. Une distance minimale entre deux aplats permet d'éviter cela. Et l'expérience montre qu'une distance minimale de l'ordre de 2 à 3 fois la dimension maximale des dits aplats est suffisante pour garantir le non déclenchement d'une réaction non souhaitée.
- [0042] Chacune des mosaïques est projetée dans la composition pendant un temps supérieur à un temps prédéfini fonction de la réactivité de la composition photoréactive. Le temps de projection doit être suffisant pour garantir, localement au niveau d'un aplat, la transformation suffisante de la composition. Des expériences ont montré que des temps de projection laser de l'ordre de quelques millisecondes sont suffisants pour assurer la transformation de la composition. Ainsi une image projetée sous forme d'une succession de mosaïques, par exemple 100 à 1000 mosaïques, peut être projetée en quelques centaines de millisecondes, ce qui permet d'imprimer des objets physiques à des vitesses comparables à l'état de l'art.
- [0043] Comme dit précédemment, un procédé selon l'invention comprend deux étapes essentielles, une étape ET2 de décomposition d'une image d'un objet à imprimer en une séquence de mosaïques comprenant des aplats de pixels éclairés de petites tailles, et une étape ET3 de projection successivement de chacune des mosaïques dans le volume de composition photoréactive.
- [0044] Dans un mode de mise en oeuvre où l'objet à imprimer est en 2D (objet avec une très faible épaisseur), l'image à projeter et les mosaïques sont également en 2D. Les

mosaïques sont projetées successivement dans un même plan focal (perpendiculaire à la direction axiale) dans le volume de composition à l'intérieur du bac de composition de sorte que l'objet se forme dans le volume de composition au fur et à mesure de la projection des mosaïques.

- [0045] Dans un autre mode de mise en oeuvre, l'image de l'objet à imprimer est une image 3D et les mosaïques et les aplats dans les mosaïques, obtenus au cours de l'étape ET2, sont également en 3D. Les mosaïques 3D sont projetées, sous forme d'image 3D dites holographiques, dans le volume de composition à l'intérieur du bac de composition de sorte que l'objet se forme en 3D dans le volume de composition au fur et à mesure de la projection des mosaïques.
- [0046] Dans un autre mode de mise en oeuvre encore, l'impression d'un objet 3D est réalisée couche par couche par l'impression successive de couches 2D adjacentes. Pour mettre en oeuvre cela, le procédé selon l'invention est complété par les étapes suivantes :
- une étape initiale (ET1) de découpage d'une image 3D en une série d'images 2D représentatives de l'objet à imprimer dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à une direction axiale de projection d'image dans le volume de composition,
  - les étapes ET2-ET3 de décomposition et de projection sont répétées pour chacune des images 2D de la série, la projection, au cours d'une étape ET3, étant réalisée selon la direction axiale dans un plan focal situé dans le volume de composition photo-réactive et perpendiculaire à la direction axiale, et :
  - une étape (ET4) de déplacement du plan focal dans le volume de composition est réalisée entre chaque réalisation des étapes ET2-ET3 de décomposition et de projection d'une image 2D.
- [0047] L'impression d'un objet peut être réalisée en quelques dizaines de secondes à quelques dizaines de minutes selon la taille de la dimension axiale de l'objet. A titre d'exemple, par projection d'images 2D par couche de résolution en z de 10  $\mu\text{m}$ , si l'impression d'une couche dure 1s, l'impression des 600 couches nécessaires à l'impression d'un objet de 6 mm dure 600s soit 10 mn.
- [0048] Selon une variante, l'étape ET4 de déplacement du plan focal est réalisée par déplacement d'un bac contenant le volume de composition par rapport à un projecteur utilisé pour réaliser l'étape ET3 de projection. Selon une autre variante, l'étape ET4 de déplacement du plan focal est réalisée par une modulation d'un faisceau initial produit par une source de lumière du projecteur utilisé pour réaliser l'étape ET3 de projection, le faisceau modulé intégrant une information relative à la position du plan focal. La réalisation concrète de ces étapes sera détaillée plus loin.
- [0049] L'invention propose également une imprimante pour la mise en oeuvre du procédé décrit ci-dessus, imprimante dont le principe est représenté de manière volontairement simplifié sur la [Fig.1]. L'imprimante comprend :

- un bac 2 contenant un volume d'une composition photoréactive, par exemple une résine photopolymérisable se solidifiant par un mécanisme d'absorption à deux photons,
- un projecteur 10 d'image agencé pour projeter une image dans le volume de composition.

- [0050] La composition photoréactive est par exemple une résine photopolymérisable se solidifiant par un mécanisme d'absorption multiphotonique, par un mécanisme d'addition de photons, par un mécanisme de polymérisation à seuil, ou par un mécanisme de chimie non linéaire.
- [0051] L'imprimante selon l'invention comprend également des moyens agencés pour mettre en oeuvre le procédé d'impression tel que décrit ci-dessus, notamment un générateur (15) de séquences de mosaïques agencé pour décomposer l'image de l'objet à imprimer en une séquence de mosaïques et fournir successivement chacune des mosaïques de la séquence au projecteur pour la réalisation de l'étape ET3 de projection.
- [0052] Lors de l'impression, le projecteur 10 projette une image dans la composition et les zones éclairées se solidifient en formant tout ou partie de l'objet à imprimer.
- [0053] Selon le mode de réalisation de la [Fig.1], le projecteur 10 comprend :
- une source (4) de lumière produisant un faisceau initial ayant des paramètres, notamment une puissance et une longueur d'onde, appropriés pour déclencher une transformation de la composition photoréactive
  - un modulateur spatial de lumière (12), agencé pour, à partir du faisceau initial et d'une matrice de pixels représentant une mosaïque à projeter, produire un faisceau à projeter par le dispositif optique, et
  - un dispositif optique d'imagerie (11) agencé pour focaliser le faisceau à projeter dans le plan focal prédéfini.
- [0054] Les moyens de mise en oeuvre du procédé d'impression peuvent également comprendre des moyens de décomposition, pour décomposer une image 3D en une série d'images 2D représentatives de l'objet à imprimer dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à la direction axiale de projection d'image dans le volume de composition. Les moyens de décomposition fournissent au générateur de mosaïques 15 les unes après les autres les images 2D de la série d'images 2D résultant de la décomposition.
- [0055] En vue de réaliser l'étape ET4, les moyens de mise en oeuvre du procédé d'impression selon l'invention comprennent également des moyens de pilotage du positionnement du plan focal.
- [0056] Selon un mode de réalisation, le bac de composition 2 est posé sur une table motorisée 3 mobile en translation axiale selon la direction de projection du projecteur 10, et des moyens de pilotage de la table motorisée sont agencés pour fournir à la dite

table motorisée un signal de commande de déplacement selon la direction axiale. Le plan focal dans le bac est ainsi déplacé par déplacement du bac.

- [0057] Selon un autre mode de réalisation, le bac de composition 2 est posé sur une table fixe, et des moyens de pilotage du projecteur sont agencés pour fournir au projecteur un signal de commande comprenant une position axiale d'un plan focal. Ainsi, la distance entre le bac et le projecteur reste fixe, mais le plan focal est déplacé dans le bac. Dans une variante de mise en oeuvre, les moyens de pilotage du projecteur fournissent au dispositif d'imagerie 11 le signal de commande comprenant la position axiale du plan focal et le dispositif d'imagerie focalise le faisceau à projeter dans le plan focal à l'intérieur du volume de composition. Dans une autre variante de mise en oeuvre, les moyens de pilotage du projecteur fournissent au modulateur 12 le signal de commande comprenant la position axiale du plan focal et le modulateur produit un faisceau modulé à projeter intégrant une information relative au plan focal.
- [0058] Dans un mode de réalisation pratique, l'imprimante selon l'invention peut être une machine électro-opto-mécanique telle que celle utilisée classiquement dans un photoplotter, dans une imprimante mettant en oeuvre un procédé de microstéréolithographie ou dans un microscope ; la machine est détournée de son usage habituel, et adaptée et complétée par les moyens de mise en oeuvre de l'invention notamment : un générateur d'images mosaïques 15, un projecteur 10 et des moyens de pilotage de la machine électro-opto-mécanique et, si la table est mobile, des moyens de pilotage de la table mobile.
- [0059] Egalement, le bac de composition 2 et / ou le dispositif optique d'imagerie 11 peuvent être agencés de moyens de déplacement latéraux (dans le plan XY) pour réaliser des objets plus larges par la projection successive de plusieurs images dans le plan latéral.
- [0060] D'autres modes de réalisation pourront facilement être imaginés par l'homme de l'art. Par exemple pour étendre la zone de fabrication limitée par le champ optique latéral d'un projecteur d'image, il est possible d'utiliser simultanément plusieurs composants de modulation spatiale ou d'effectuer des déplacements latéraux du projecteur optique ou du bac de résine. Egalement, pour étendre la longueur de la zone de fabrication des résines liquides, il est possible de déplacer axialement un élément adapté du projecteur optique dans le bac de la résine. Pour diversifier le mode de dépôt des résines sans utiliser de bac de composition, il est possible de faire des dépôts localisés de résines visqueuses ou solides sur des composants ou surfaces fonctionnelles. Ou encore, pour atteindre des zones à polymériser difficiles d'accès, il est possible d'utiliser des projecteurs d'images non conventionnels à base de fibres optiques ou de composants optiques miniatures.
- [0061] En synthèse, l'invention propose un procédé d'impression 3D et des moyens pour la

mise en oeuvre du dit procédé, qui apportent notamment les bénéfices techniques et économiques suivants :

- la possibilité de réaliser, par impression 3D volumique, des objets de grande dimension, de l'ordre de 1000 à 10000 fois les dimensions d'un pixel, avec une très grande résolution axiale et en des temps relativement courts, de l'ordre de quelques dizaines de secondes à quelques dizaines de minutes selon la taille de leur dimension axiale,
- la possibilité d'imprimer un objet directement dans un bac contenant la composition à modifier, sans déplacer le porte-échantillon positionné dans le bac et sur lequel l'objet est imprimé, sans utiliser de porte-échantillon et / ou sans déplacer le bac de composition
- il n'est plus nécessaire d'ajouter dans la composition à modifier un additif visant à limiter la propagation de la réaction selon la direction axiale à une épaisseur de couche prédéfinie pour améliorer la résolution de l'objet imprimé,
- des compositions visqueuses, voire solides, peuvent être utilisées ; il suffit qu'elles soient transparentes.

## Revendications

- [Revendication 1] Procédé d'impression d'un objet dans un volume de composition photo-réactive à partir d'une image de l'objet à imprimer, image définie par une matrice de pixels comprenant une pluralité de pixels éclairés adjacents définissant l'objet à imprimer, procédé d'impression caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes, consistant à :
- décomposer (ET2) l'image en une séquence de mosaïques, chaque mosaïque étant définie par une matrice de pixels comprenant une pluralité de groupes de pixels éclairés adjacents autrement nommés aplats, une superposition de toutes les mosaïques de la séquence permettant de reconstituer l'image de l'objet à imprimer, une plus grande dimension d'un aplat d'une mosaïque étant inférieure à une dimension maximale fonction d'une résolution axiale souhaitée pour l'objet prédéfini et une plus petite distance entre deux aplats étant supérieure à une distance minimale fonction de la résolution axiale souhaitée, et
  - projeter (ET3), selon une direction axiale, successivement chacune des mosaïques de la séquence de mosaïques dans le volume de composition photoréactive.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1 dans lequel la dimension maximale est inférieure à 10  $\mu\text{m}$ .
- [Revendication 3] Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel la distance minimale est de l'ordre de 2 à 3 fois la dimension maximale.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une des revendications précédentes dans lequel chacune des mosaïques est projetée pendant un temps supérieur à un temps prédéfini fonction d'une réactivité de la composition photoréactive.
- [Revendication 5] Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que l'image de l'objet à imprimer est une image en trois dimensions (3D) et en ce que les mosaïques et les aplats dans les dites mosaïques sont en trois dimensions (3D).
- [Revendication 6] Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, adapté pour l'impression d'un objet à partir de l'image 3D du dit objet, procédé caractérisé en ce que le procédé comprend également les étapes suivantes :
- une étape initiale (ET1) de découpage d'une image 3D en une série d'images 2D représentatives de l'objet à imprimer dans des plans parallèles entre eux et perpendiculaires à une direction axiale de projection d'image dans le volume de composition,

- les étapes ET2-ET3 de décomposition et de projection sont répétées pour chacune des images 2D de la série, la projection, au cours d'une étape ET3, étant réalisée selon la direction axiale dans un plan focal situé dans le volume de composition photoréactive et perpendiculaire à la direction axiale, et :

- une étape (ET4) de déplacement du plan focal dans le volume de composition est réalisée entre chaque réalisation des étapes ET2-ET3 de décomposition et de projection d'une image 2D.

[Revendication 7] Procédé selon la revendication 6 dans lequel l'étape ET4 de déplacement du plan focal est réalisée par déplacement d'un bac contenant le volume de composition par rapport à un projecteur utilisé pour réaliser l'étape ET3 de projection.

[Revendication 8] Procédé selon la revendication 6 dans lequel l'étape ET4 de déplacement du plan focal est réalisée par une modulation d'un faisceau initial produit par une source de lumière du projecteur utilisé pour réaliser l'étape ET3 de projection, le faisceau modulé intégrant une information relative à la position du plan focal.

[Revendication 9] Imprimante adaptée pour la mise en oeuvre d'un procédé d'impression selon l'une des revendications précédentes, imprimante comprenant notamment :

- un bac (2) contenant un volume de composition photoréactive, et  
- un projecteur (10) d'image agencé pour projeter une image dans le volume de composition,

l'imprimante comprenant également des moyens agencés pour mettre en oeuvre le procédé d'impression selon l'une des revendications précédentes, les dits moyens comprenant un générateur (15) de séquences de mosaïques agencé pour décomposer l'image de l'objet à imprimer en une séquence de mosaïques et fournir successivement chacune des mosaïques de la séquence au projecteur pour la réalisation de l'étape ET3 de projection.

[Revendication 10] Imprimante selon la revendication 9 dans laquelle le projecteur comprend :

- une source (4) de lumière produisant un faisceau initial ayant des paramètres, notamment une puissance et une longueur d'onde, appropriés pour déclencher une transformation de la composition photoréactive  
- un modulateur spatial de lumière (12), agencé pour, à partir du faisceau initial et d'une matrice de pixels représentant une mosaïque à projeter, produire un faisceau à projeter par le dispositif optique, et

- un dispositif optique d'imagerie (11) agencé pour focaliser le faisceau à projeter dans le plan focal prédéfini.

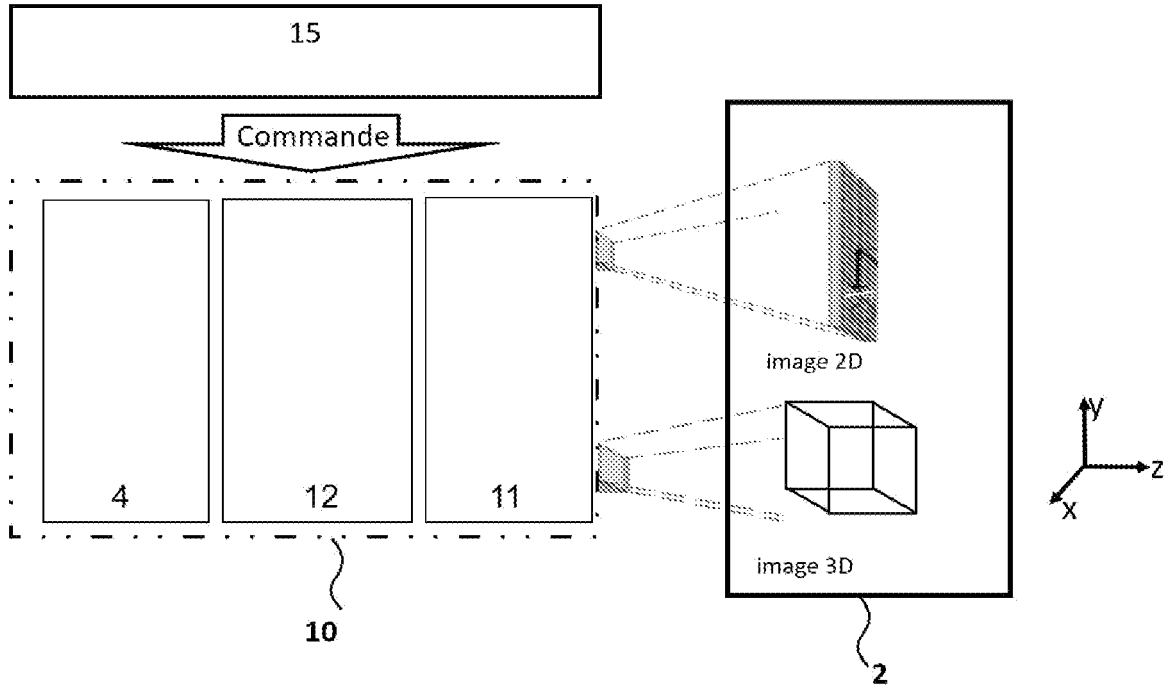
[Revendication 11]

Imprimante selon la revendication 9 ou 10 en combinaison avec la revendication 6, dans laquelle, en vue de déplacer (ET4) le plan focal de projection, les moyens de mise en oeuvre du procédé d'impression comprennent également :

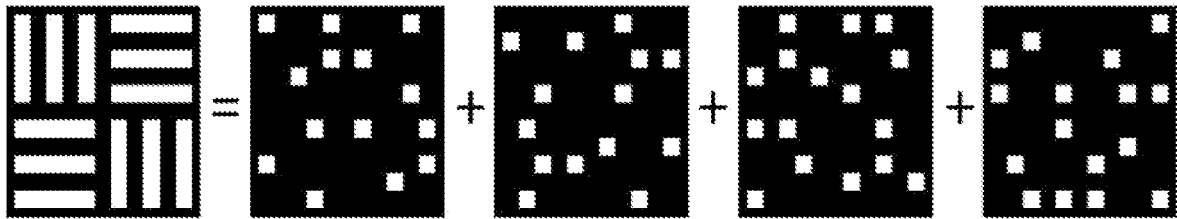
- des moyens de pilotage d'une table motorisée supportant le bac de composition, agencés pour fournir à la dite table motorisée un signal de commande de déplacement selon la direction axiale et / ou

- des moyens de pilotage du projecteur, agencés pour fournir au projecteur un signal de commande comprenant une position axiale du plan focal.

[Fig. 1]



[Fig. 2]



# RAPPORT DE RECHERCHE

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

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

---

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (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 2011/101570 A1 (JOHN HENDRIK [DE] ET  
AL) 5 mai 2011 (2011-05-05)

US 2015/328834 A1 (BAUER CHRISTIAN [DE] ET  
AL) 19 novembre 2015 (2015-11-19)

FR 3 023 012 A1 (UNIV JOSEPH FOURIER [FR];  
CENTRE NAT RECH SCIENT [FR])  
1 janvier 2016 (2016-01-01)

**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